Conseil national de recherches Canada
Institut de génie des matériaux
Boucherville (Québec)

National Research Council Canada
Industrial Materials Research Institute
Boucherville, Quebec

25424

L'USURE DANS LES BROYEURS A BOULETS

IGM87D-204-644-G
CNRC 28426

L'USURE DANS LES BROYEURS À BOULETS

SYLVAIN TURENNE

INSTITUT DE GÉNIE DES MATÉRIAUX
CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES CANADA
75 BOUL. DE MORTAGNE
BOUCHERVILLE (QUÉBEC)
J4B 6Y4

TABLE DES MATIÈRES

		Page
LISTE DES FIGURES		ii
INTRODUCTION		1
1-	BROYEURS À BOULETS	2
	1.1 Lois de broyage	2
	1.2 Modes d'opération en fonction de la vitesse critique	5
	1.3 Types de broyeurs à boulets	8
	1.4 Paramètres des broyeurs	11
	1.5 Théories d'usure des boulets	10
2-	ESSAIS D'USURE	15
3-	MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LES BOULETS	27
4-	BLINDAGE DES BROYEURS	47
	4.1 Forme du blindage	47
	4.2 Matériaux utilisés pour le blindage	51
CONCLUSION		55
RÉFÉRENCES		56

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1	Modes d'opération d'un broyeur à boulets a) marche en cascade b) marche en cataracte c) trajectoire correspondant aux releveurs	7
Figure 2	Types de broyeurs (d'après Desrumaux, 1972)	9
Figure 3	Circuit de broyage à deux niveaux (Wills, 1985)	10
Figure 4	Machine d'impact boulet-sur-boulet (Blickensderfer et al., 1984)	16
Figure 5	Machine d'impact boulet-sur-enclume (Blickensderfer et Forkner, 1983)	17
Figure 6	Usure mesurée des boulets montrant un bon accord avec les théories du volume et de la surface (Vermeulen et Howatt, 1983)	21
Figure 7	Machine d'impact de Rice (1977)	22
Figure 8	Machine d'usure de White et al. (1984)	23
Figure 9	Machine d'usure - impact de Vinogradov et al. (1966)	25
Figure 10	Machine d'impact-abrasion de l'IGM	26

		Page
Figure 11	Dureté le long d'un diamètre de boulet forgé (Nass, 1974)	29
Figure 12	Usure d'un boulet au chrome coulé comparée à celle d'un boulet forgé (publicité Magotteaux)	30
Figure 13	Taux d'usure en fonction de la concentration de la pulpe (Iwasaki et al., 1984)	31
Figure 14	Efficacité de broyage en fonction du temps et de la concentration de la pulpe (Iwasaki et al., 1984)	32
Figure 15	Distribution de la contrainte dans des matériaux ductile et fragile (Vermeulen et Howatt, 1984)	39
Figure 16	Section du diagramme Fe-C-Cr à 1000°C (Sailors et Owens, 1982)	42
Figure 17	Indice d'abrasivité en fonction de l'humidité du milieu (Jones, 1985)	44
Figure 18	Formes de différents blindages pour soulever les boulets (Crisi, 1981)	48
Figure 19	Formes de divers blindages classificateurs (Crisi, 1981)	49
Figure 20	Profil de différents types de blindage. Le pointillé indique le profil après usure (Dunn, 1976)	52

INTRODUCTION

La consommation croissante des matières premières nécessite l'exploitation des produits naturels minéraux avec des teneurs en éléments métalliques de plus en plus faibles. Après l'extraction du minerai de la mine, l'étape de broyage précède celles de séparation et de concentration qui s'effectuent sur des particules de tailles fines.

Les opérations de broyage sont multiples compte tenu des tailles différentes du minerai de la sortie de la mine (50 cm) jusqu'à la taille la plus fine (10-50 μm). Les premières étapes du broyage sont effectuées par des concasseurs à machoires et/ou broyeurs coniques. Ensuite, viennent les étapes de broyage plus fin associées aux broyeurs à barres et à boulets. Ce dernier type de broyeur sera couvert du point de vue de l'usure des boulets et du blindage.

La consommation d'énergie de l'étape de broyage fin est la plus grande comparée au concassage grossier. A titre d'exemple, la quantité de boulets consommés aux États-Unis atteint près de un demi milliard de livres par année! Les coûts associés à l'usure des boulets et des blindages sont variables d'une mine à l'autre du fait qu'ils incluent les coûts reliés à la perte de production nécessitée par le remplacement du blindage.

La présente revue se consacre principalement à décrire le phénomène de l'usure des boulets et du blindage. Les principales méthodes expérimentales simulant l'usure de ces composantes sont décrites. De plus, les matériaux utilisés pour les boulets ainsi que leurs comportements en service sont aussi énumérés. Une analyse semblable est aussi faite en ce qui a trait aux blindages. L'influence de la corrosion est aussi couverte par cette revue.

1. BROYEURS À BOULETS

Le principe de fonctionnement de la mécanique interne est assez simple. Le broyeur est constitué d'un tambour cylindrique tournant autour de son axe horizontal. Les parois internes sont couvertes d'un blindage qui sert de protection pour le cylindre d'une part et de support de levage d'autre part. Le cylindre est partiellement rempli de corps broyants (tels que boulets, "slug", etc.) et de minerai à broyer.

Lorsque le tambour est mis en rotation, le blindage provoque le relevage des corps broyants et leur chute sur le minerai qui est ainsi broyé par la force d'impact.

A cette description simplifiée s'ajoute plusieurs théories et paramètres d'opération qui nécessite l'optimisation du procédé, parfois associé aux compromis. Ces théories et paramètres sont brièvement décrits dans les sections suivantes.

1.1 Lois de broyage

Les théories de la fragmentation tentent essentiellement de relier l'énergie mise en cause pour amener des particules d'une taille initiale connue une taille finale telle que souhaitée.

Les trois lois les plus importantes sont applicables pour des tailles initiales de minerai différentes.

La loi la plus ancienne est celle de Rittinger (1867) qui stipule que l'énergie consommée lors de la fragmentation est proportionnelle à l'aire des nouvelles surfaces produites. La surface par unité de volume de particules de diamètre uniforme étant inversement proportionnelle au diamètre, la lois de Rittinger s'énonce ainsi:

$$W = K\ (1/d - 1/D)$$

où W est l'énergie utile consommée, D et d représentent respectivement les diamètres avant et après l'opération de broyage, K étant une constante. Il est important de réaliser que l'énergie utile correspond à près de 1% seulement de l'énergie totale fournie au broyeur, le reste de l'énergie se dissipant en chaleur (Wills, 1985). Cette loi s'applique préférentiellement au broyage de fines particules (10 à 1000 µm).

La seconde loi proposée par Kick en 1885 postule que le travail utile est proportionnel à la réduction de volume des particules. La relation proposée se présente sous forme logarithmique:

$$W = K' \log (D/d)$$

Cette loi, contrairement à celle de Rittinger, montre un bon accord avec la fragmentation de grosses particules (1 cm).

La théorie de Bond (1952) fait le lien entre celles de Rittinger et Kick. Cette théorie suppose que l'énergie associée à la compression se répartit d'abord dans la masse et par conséquent est proportionnelle à D^3. A partir du moment où il y a présence de fissure, l'énergie se concentre sur les lèvres de la fissure; donc proportionnalité avec la surface ou carré du diamètre D. Le travail de broyage est donc proportionnel à un exposant du diamètre se trouvant entre 2 et 3.

Le critère de taille d'une distribution de particules de tailles différentes est le suivant: on choisit la taille des particules en microns correspondant à la maille en microns du tamis qui donne 80% en poids de passé au travers. On définit ainsi par D la taille du 80% associée au produit et par F, celle associée à l'alimentation du broyeur. Soit W', l'énergie consommée en kWh par 2000 lbs (short ton) de minerai:

$$W' = 10\ Wi\ (1/\sqrt{P} - 1/\sqrt{F})$$

où Wi est l'indice de broyabilité (work index) de Bond et est une caractéristique du minerai représentant sa résistance au broyage.

Le tableau 1 donne les indices de Bond pour quelques minéraux. Cet indice correspond numériquement au nombre de kWh par 2000 lbs de minerai pour obtenir 80% des particules plus petites que 100 µm.

TABLEAU 1: INDICES DE BOND DE CERTAINS MINÉRAUX (WILLS, 1985)

Bauxite	8,78
Charbon	13,00
Emeri	56,70
Granite	15,13
Graphite	43,56
Quartzite	9,58
Quartz	13,57

La loi de Bond, dite "troisième loi", ainsi que la définition de l'indice de broyabilité des matériaux permettent de déterminer avec une précision raisonnable l'énergie associée à la réduction de taille du minerai (Blanc, 1965).

I.2 Modes d'opération en fonction de la vitesse critique

Les modes d'opération du broyeur à boulets sont fonction de la vitesse de rotation du tambour. La vitesse de rotation est le plus souvent exprimée en pourcentage de la vitesse critique. La vitesse critique est définie comme étant celle où la force gravitationnelle de la charge est équilibrée par la réaction centrifuge à la force centripète. A la vitesse critique, il n'y a pas

de glissement de la charge par rapport au blindage. La vitesse critique dépend essentiellement du diamètre du tambour. Les broyeurs à boulets tournent généralement entre 70 et 80% de la vitesse critique.

Le mouvement de la charge à l'intérieur du broyeur est dicté par la vitesse de rotation. L'efficacité de broyage ainsi que l'usure des boulets et du blindage sont aussi intimement reliées à la vitesse d'opération. Aux faibles vitesses de rotation, la charge prend une forme d'équilibre dynamique; cette condition correspond à la marche en cascade (fig. 1). Une petite zone centrale est à toute fin pratique immobile alors qu'autour de cette zone, il y a un roulement de la charge. Les boulets roulent les uns sur les autres provoquant un broyage du minerai par effet de cisaillement. L'usure du boulet peut ici être associée à l'usure abrasive à trois corps. Pour des vitesses de rotation plus élevées, les corps broyants sont soulevés par le blindage et relâchés; par l'action de la force gravitationnelle, les boulets tombent en chute libre selon une trajectoire parabolique. Le broyage prend place à l'endroit où les boulets retombent; ceci correspond à la marche en cataracte. Les impacts subits par les boulets ne sont pas étrangers à l'usure rapide dont ils sont victimes. La marche en cataracte convient pour la fragmentation de grosse particules; la marche en cascade par son action abrasive est plus efficace pour le broyage fin.

Le choix de la vitesse d'opération dépend de la charge, du degré de remplissage du broyeur ainsi que de son diamètre. L'efficacité du broyeur se gagne quelquefois au dépend de la durée de vie des boulets et du blindage.

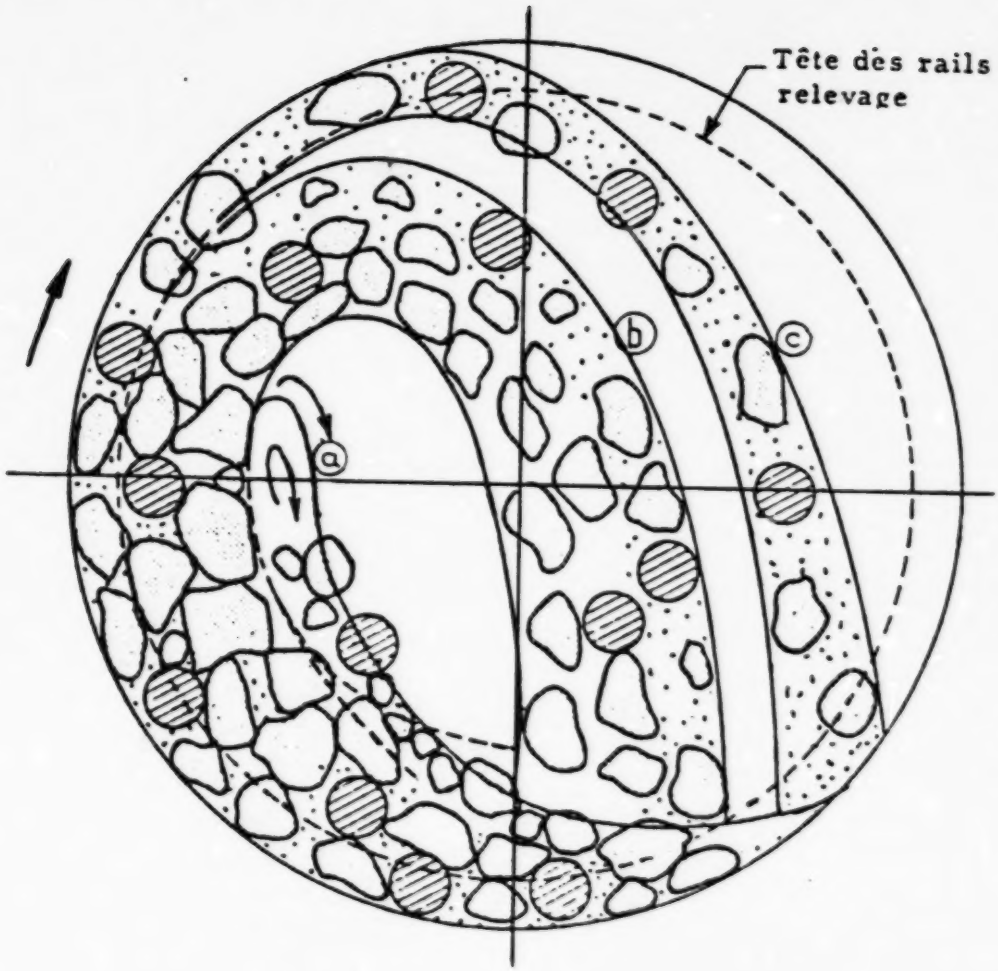


Figure 1 Modes d'opération d'un broyeur à boulets

a) marche en cascade

b) marche en cataracte

c) trajectoire correspondant aux releveurs

1.3 Types de broyeurs à boulets

On rencontre deux grandes catégories de broyeurs à boulets. Les broyeurs courts sont ceux dont le rapport longueur sur diamètre est plus petit que 2. Les broyeurs longs sont constitués de plusieurs compartiments et leur rapport longueur sur diamètre se situe entre 3 et 6.

Faisant partie des broyeurs courts, on distingue les types à sortie centrale et périphérique. Ces deux types apparaissent soit avec sortie par débordement (overflow) ou par grille.

De même, les broyeurs longs peuvent posséder une sortie par débordement ou par grille. Les broyeurs longs sont surtout utilisés dans les cimenteries. Les différents types de broyeurs sont montrés à la figure 2.

Les broyeurs à grille ont généralement un niveau de pulpe (minerai + eau) plus faible que ceux à débordement. Le temps de résidence de la pulpe à l'intérieur du broyeur est aussi plus court. Il en résulte un produit à la sortie de taille plus grande que dans le cas des broyeurs à débordement. Dans un circuit de broyage (fig. 3), les broyeurs à grille sont employés lors du broyage primaire.

Plus récemment, l'apparition de broyeurs autogènes amène une approche intéressante du fait que la consommation de corps broyants est nulle. Dans ce type de broyeur, les grosses particules jouent le rôle de corps broyants.

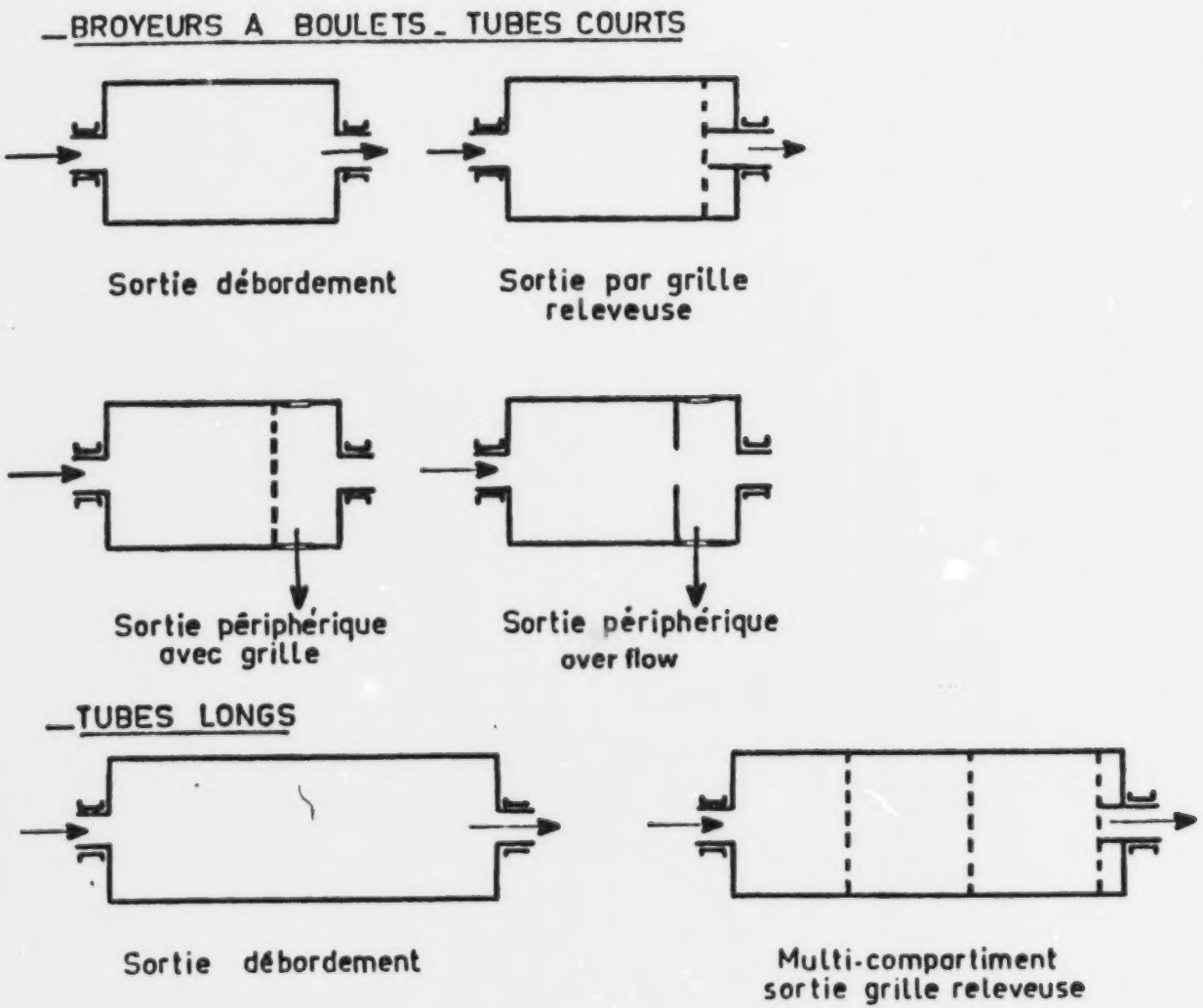


Figure 2 Types de broyeurs (d'après Desrumaux, 1972)

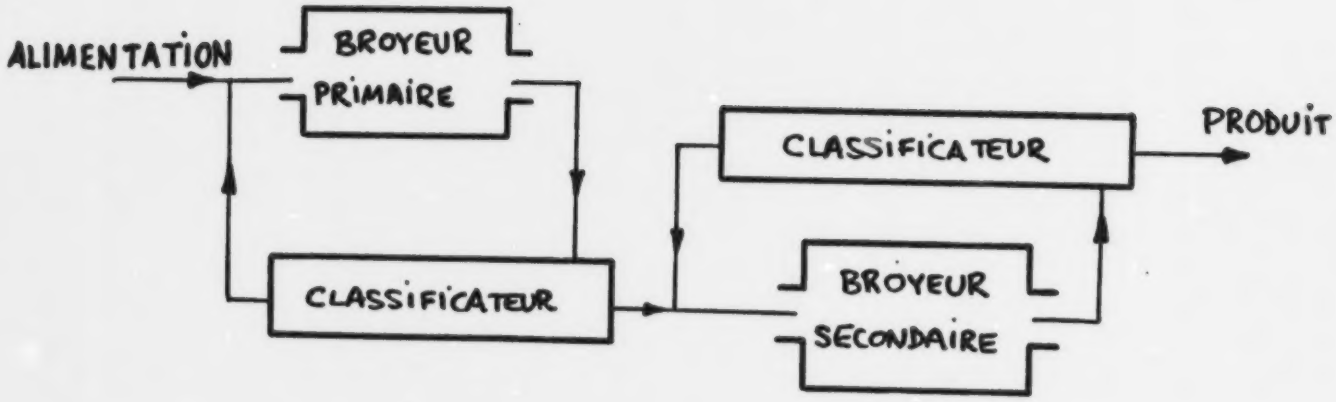


Figure 3 Circuit de broyage à deux niveaux (Wills, 1985)

Finalement, les broyeurs semi-autogènes utilisent une faible fraction de corps broyants consommables.

1.4 Paramètres des broyeurs

Le but n'est pas ici de décrire en détail tous les paramètres reliés au fonctionnement et au rendement des broyeurs. Seuls les paramètres pouvant jouer un rôle sur l'usure des boulets et du blindage sont présentés brièvement.

La vitesse de rotation du tambour, tel que nous l'avons mentionné au début, détermine le mouvement de la charge broyante. Pour des vitesses de rotation faibles, l'aspect abrasion aura plus d'importance que celui d'impact. Par contre, la marche en cataracte conduit à des impacts importants sur les boulets et sur le blindage. La vitesse devra donc être choisie de façon à maximiser le rendement du broyeur tout en minimisant l'usure des boulets et du blindage.

Le diamètre des broyeurs est de plus en plus élevé. Un grand diamètre favorise une distance de chute des boulets plus grande et ainsi une force d'impact plus grande. De plus, le volume de broyage augmentant, la productivité augmente. Les broyeurs à boulets conventionnels atteignent maintenant près de 5,5 m de diamètre. Les broyeurs autogènes vont jusqu'à 10,7 m de diamètre. De plus, la vitesse critique étant inversement proportionnelle à la racine carrée du diamètre, des vitesses de rotation plus faibles sont obtenues avec des grands diamètres, ce qui peut représenter un certain avantage.

L'utilisation d'eau pour former la pulpe présente de multiples avantages (Wills, 1985). Le broyage en voie humide montre une consommation d'énergie plus faible qu'en voie sèche par tonne de produit broyé. La capacité du broyeur se trouve donc accrue par unité de volume du broyeur. De plus, le tri des particules à l'aide de filtres est plus facile, ce qui facilite la séparation. Le transport de la pulpe peut aussi se faire à l'aide de pompes et tuyauterie. Finalement, le problème de la poussière est éliminé. Cependant, les boulets et le blindage deviennent susceptibles à la corrosion et le choix des matériaux pour ces usages devra en tenir compte.

Les boulets à l'intérieur du broyeur n'ont généralement pas tous la même taille. Lors du broyage, il s'établit une distribution dans la taille des boulets. Cette distribution prend place suite à l'usure des boulets et il y a équilibre dynamique reliée à la disparition des boulets suite à l'usure et l'apparition des nouveaux en provenance du lot d'alimentation. Pour obtenir un taux de production stable (régime permanent) dès le départ de la mise en opération du broyeur, il est utile de mettre dès le début des boulets avec une distribution de taille se rapprochant de celle à l'équilibre (Austin et Klimpel, 1985). Les lois d'usure des boulets doivent donc être bien connues pour évaluer la distribution initiale fonction des paramètres de fonctionnement du broyeur.

De même, la proportion de boulets ainsi que le pourcentage de remplissage du broyeur sont importants. En effet, un broyeur non suffisamment rempli pourra amener une détérioration du blindage si les boulets en chute libre

s'abattent sur le blindage au lieu du minerai. De plus, une trop grande proportion de boulets amènera des chocs boulets-boulets plus fréquents, la pulpe n'agissant plus comme amortisseur.

1.5 Théories d'usure des boulets

Vermeulen et al. (1983) décrivent bien les deux principales théories d'usure des boulets. La première proposée par Davis en 1919, stipule que l'impact des boulets est la principale cause d'usure. La force d'impact étant proportionnelle à la masse du boulet, Davis propose que le taux d'usure d'un boulet de masse m est proportionnel à cette même masse:

$$- dm/dM = m/T$$

où M est la masse de minerai broyé et T est une constante. On obtient ainsi, la masse du boulet en fonction de la masse de minerai broyé:

$$m\ (M) = m_o\ \exp\ (- M/T)$$

où m_o est la masse initiale du boulet. La constante T représente la masse de minerai broyé correspondant à une masse du boulet usé égale à environ 37% de sa masse initiale. Cette loi exponentielle de perte de masse découle de la "théorie du volume".

La théorie proposée par Prentice (1943) est basée sur l'observation de l'usure des boulets par abrasion à trois corps. L'usure est ainsi proportionnelle à la surface du boulet, d'où le nom de cette théorie: "théorie de la surface". La surface d'un boulet de masse m est proportionnelle à $m^{2/3}$. Ainsi, le taux d'érosion s'écrit:

$$- dm/dM = bm^{2/3}$$

où b est une constante. Après intégration, on obtient:

$$m(M) = (m_o^{1/3} - 1/3\, bM)^3$$

La réalité se trouve probablement entre ces deux théories. En effet, les boulets sont soumis à des impacts en même temps qu'à l'abrasion. Ce type d'usure est difficile à modéliser et les essais le simulant ne conviennent pas toujours pour approcher la réalité. Différentes méthodes d'essais sont énumérées dans la section suivante.

2. ESSAIS D'USURE

L'usure des boulets peut se décomposer en trois composantes principales: impact, abrasion et corrosion. Il est à peu près certain qu'il existe une synergie entre ces mécanismes d'usure. Plusieurs machines ou systèmes ont été mis au point afin de simuler une ou plusieurs composantes de l'usure des boulets.

Comme nous l'avons vu précédemment, la force d'impact sur les boulets résulte le plus souvent de la chute libre du boulet lors de la marche en cataracte. Certains appareils ont donc repris le principe de la chute libre pour simuler les impacts. La machine montrée à la figure 4 est essentiellement basée sur un "remonte-charge" qui, au haut du montage, libère un boulet qui tombe en chute libre sur l'empilement de boulets tombés auparavant. On note donc un impact direct entre le boulet en chute et le boulet juste au-dessous et un impact indirect entre les boulets qui sont en contact au bas de la chute. Une variante de cette méthode d'essai est présentée à la figure 5. Dans ce montage, les boulets sont lâchés sur un bloc pouvant simuler un boulet ou le blindage. De plus, des particules abrasives sont introduites pour simuler la présence du minerai entre les surfaces d'impact. Ces deux types de systèmes ont comme inconvénient majeur de ne pas fournir la mesure de la force d'impact maximum. La "rigidité" de la cible est aussi importante à considérer en relation avec celle présente au niveau du point de chute à l'intérieur du broyeur. En effet, ces méthodes d'essais tendent à donner un ammortissement moins important que celui associé à un tas de boulets baignant dans la pulpe.

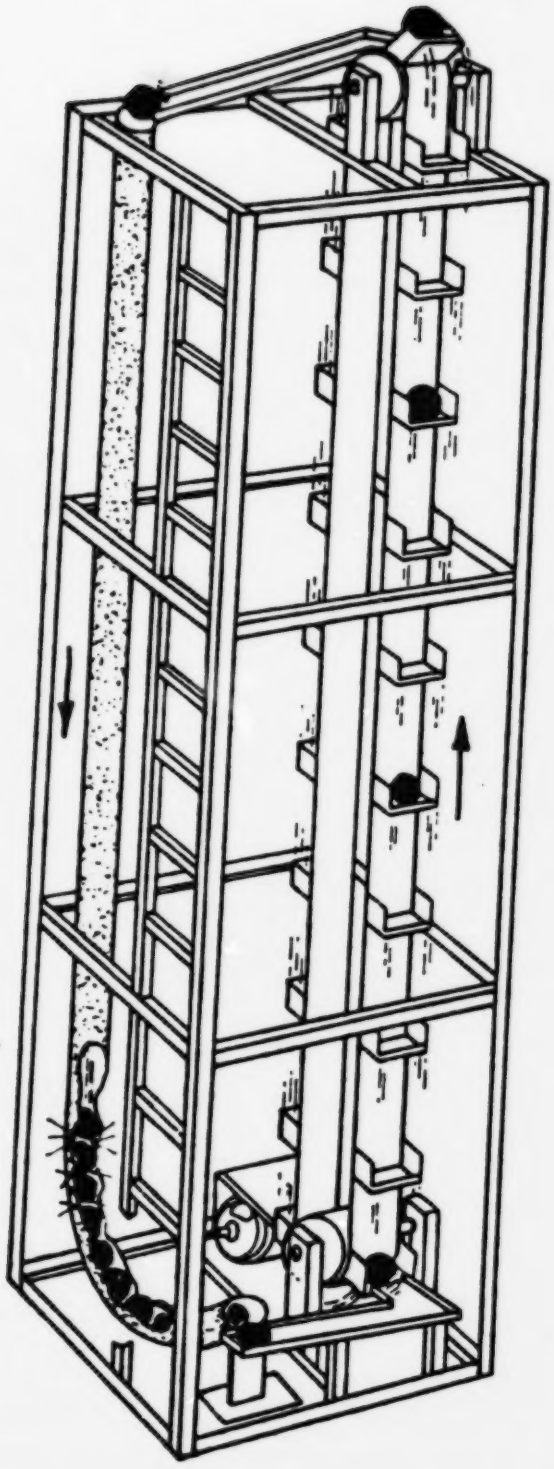


Figure 4 Machine d'impact boulet-sur-boulet (Blickensderfer et al., 1984)

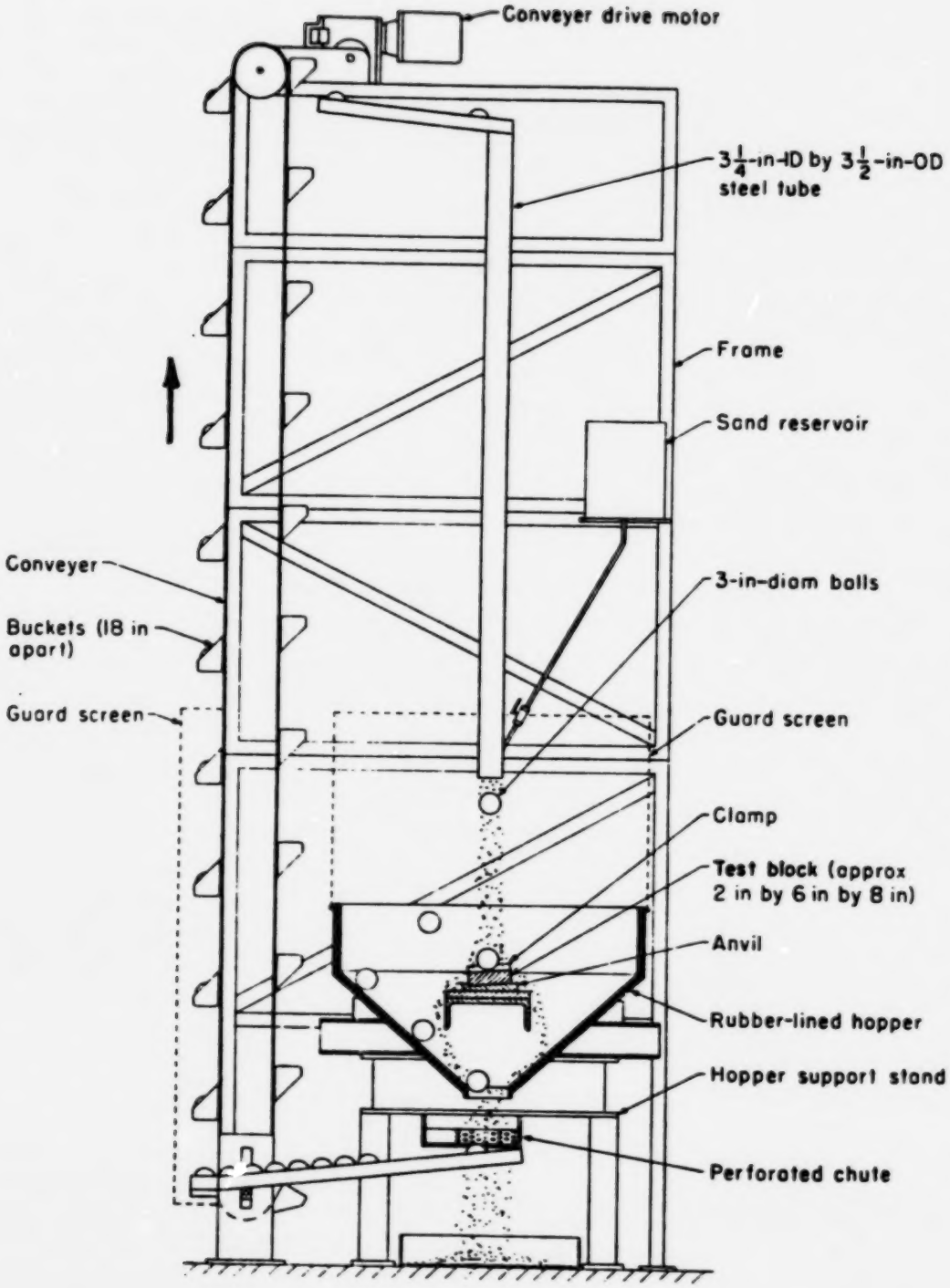


Figure 5 Machine d'impact boulet-sur-enclume (Blickensderfer et Forkner, 1983)

Afin de mesurer la force d'impact (ou la décélération du boulet) à l'intérieur du broyeur, Dunn et Martin (1978) proposent d'utiliser un boulet contenant des accéléromètres. Ces accéléromètres ont la particularité de "garder en mémoire" la plus grande accélération subie par le boulet lors du broyage. Leurs résultats montrent des forces d'impact semblables à celles prévues théoriquement. Cependant, cette méthode d'évaluation est imprécise et ne fonctionne bien que si l'impact est dans l'axe des accéléromètres.

L'utilisation de broyeurs "modèles réduits" semble à priori intéressante pour évaluer les taux d'usure des boulets. Rigaut et al. (1976) ont utilisé des broyeurs expérimentaux de faibles dimensions dans le but de rendre plus facile la cueillette des échantillons et des résultats. Pour visualiser le mouvement des boulets, ils ont utilisé un broyeur construit en matière plastique d'un diamètre de 30 cm et d'une longueur de 6,2 cm. Ce modèle réduit est 6 fois plus petit que le broyeur semi-industriel utilisé pour les essais de broyage (diamètre: 1,8 m, longueur: 35 cm). Bien que pour l'étude du mouvement des boulets, les modèles réduits s'avèrent utiles, ils deviennent moins précieux pour l'évaluation de l'usure des boulets. En effet, les distances de chute moins grandes conduisent à des forces d'impact plus faibles, et donc à des mécanismes d'usure différents. De plus, la faible longueur du broyeur expérimental utilisé par Rigaut et al. (1976) donne un rôle prépondérant à l'effet de bord qui peut être négligé lorsque le rapport longueur/diamètre est de l'ordre de 1,5 à 2.

L'essais d'usure s'approchant le plus de la réalité est l'essai de boulets marqués (Vermeulen et Howatt, 1983, Barbery, 1985). C'est Norman et Loeb (1948) qui énumèrent les premiers, les étapes de cette technique. Tout d'abord, il faut choisir un groupe de boulets pour chaque nuance d'acier à tester. Un groupe est composé de 5 à 15 boulets de façon à évaluer correctement l'erreur expérimentale. Les boulets des différents groupes sont ensuite marqués à l'aide de trous disposés à la surface des boulets de façon à pouvoir identifier clairement chaque groupe. Lors de l'essai, l'usure associée à l'écaillage du boulet causé par la présente du trou ne devra pas être considérée. Les défauts de surface ainsi que la couche décarburée devront aussi être enlevés avant l'essai. Un des moyens utilisés est de soumettre les boulets marqués à l'usure dans un petit broyeur. Le problème majeur de cette technique réside dans la recherche des boulets marqués à l'intérieur du broyeur industriel. Afin de contourner le problème, il suffit de mettre au départ des boulets de même masse appartenant à un même groupe. Ainsi, en supposant que les boulets d'un même groupe s'usent de la même façon, il n'est pas nécessaire de les trouver tous. Une fraction de 60 à 80% de boulets retrouvés est satisfaisante. A chaque arrêt du broyeur, les boulets sont nettoyés et pesés. On classe ensuite les boulets en comparant la masse perdue par unité de surface d'un boulet appartenant à un groupe par rapport au boulet choisi comme standard.

Les résultats obtenus à partir de la technique du boulet marqué peuvent servir à vérifier les lois d'usure des boulets. C'est ainsi que dans un cas particulier, Vermeulen et Howatt (1983) montrent que l'accord est bon

entre les points expérimentaux et les théories de surface et volume (figure 6.) Ceci est dû au fait que les deux théories montrent des comportements très similaires dans le domaine d'usure en service associé au cas particulier traité.

D'autres types de machines s'éloignent des conditions en service tout en gagnant sur la mesure de paramètres importants. La machine de Rice (1977), telle que montrée schématiquement à la figure 7, permet de mesurer la force d'impact à l'aide du transducteur (18). L'échantillon (16) est amené à la surface d'une roue (20) qui peut être mise en rotation par l'entremise d'une transmission (26) et d'un moteur (10). Le rotor (12) actionné par le même moteur donne à l'échantillon un mouvement oscillatoire avec fréquence contrôlable. L'amplitude de l'oscillation peut être réglée en faisant pivoter le rotor (12) autour du pivot (72) à l'aide d'un autre moteur (90). White et al. (1984) utilisent un montage similaire à celui de Rice; la principale différence réside dans le mécanisme transmettant le mouvement oscillatoire à l'échantillon. Dans ce cas, le mouvement est contrôlé par un piston hydraulique (fig. 8).

Le principe d'un projectile lancé sur une surface en mouvement est à la base de la machine proposée par Bayer et al. (1972). Les projectiles ont la forme de balles et un mécanisme permet d'obtenir un seul impact par projectile, les rebonds étant amortis. Le type d'usure rencontré dans ce type d'appareil n'est pas tellement représentatif de celui observé en service dans les broyeurs.

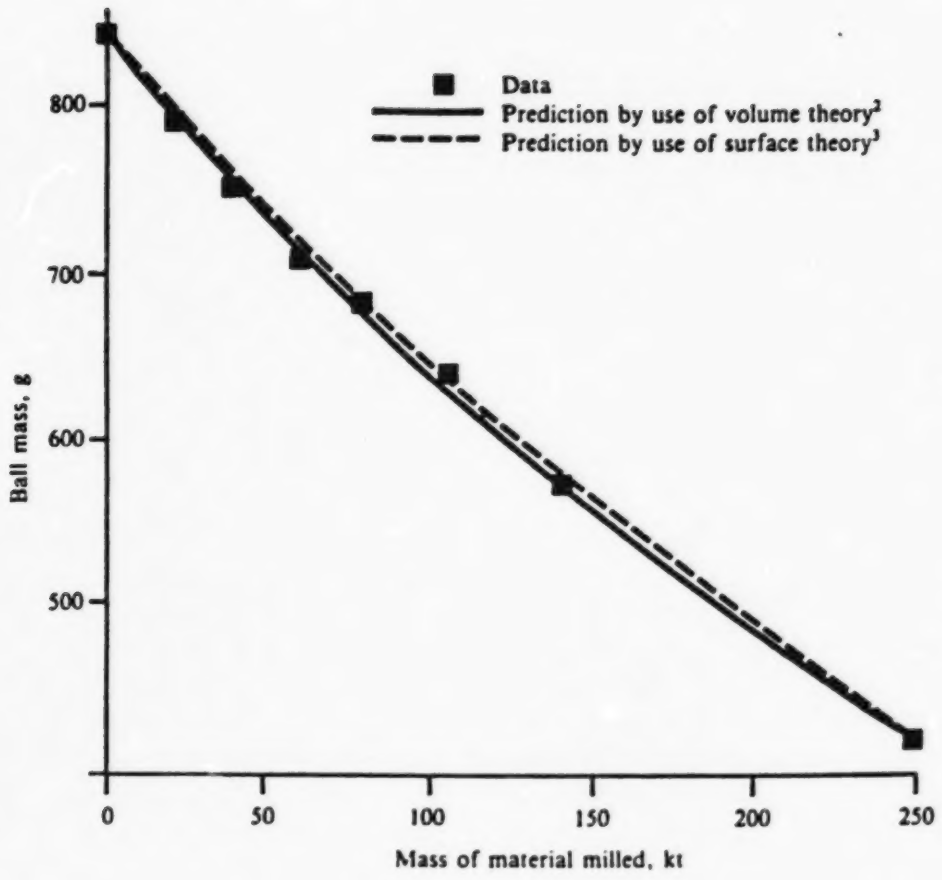


Figure 6 Usure mesurée des boulets montrant un bon accord avec les théories du volume et de la surface (Vermeulen et Howatt, 1983)

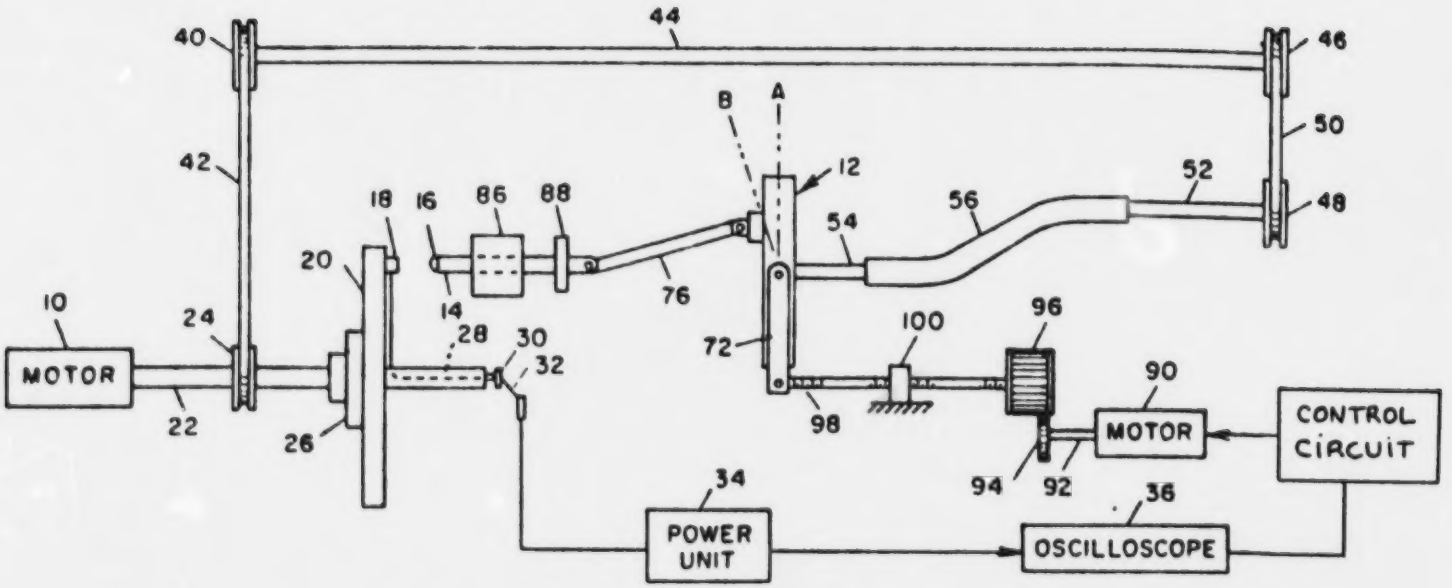


Figure 7 Machine d'impact de Rice (1977)

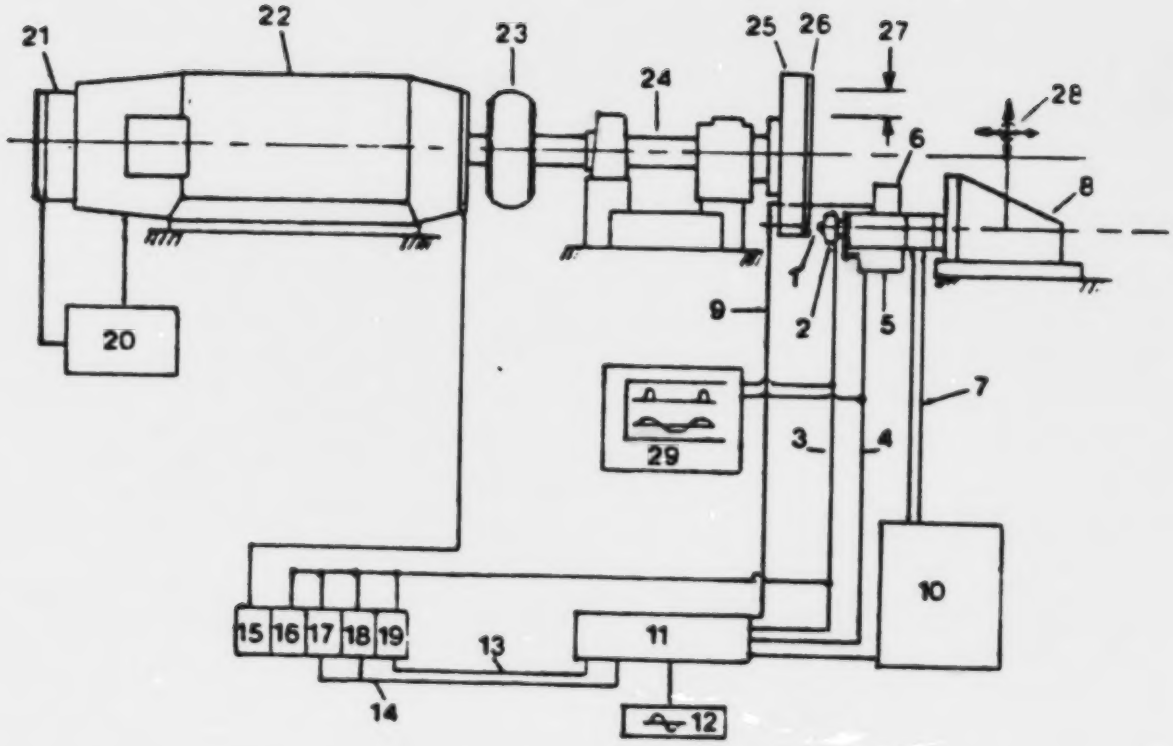


Figure 8 Machine d'usure de White et al. (1984)

Finalement, une autre façon de faire est utilisée par Vinogradov et al. (1966). Leur machine est représentée à la figure 9. L'impact est transmis à l'échantillon (6) par l'entremise des masses (12). Ce qui est différent ici, c'est la présence d'un abrasif pouvant se trouver sous forme de ruban (7) ou sous forme d'abrasif libre. Un mécanisme permet le déplacement latéral de la bande de façon à ce que l'échantillon voit à chaque impact de l'abrasif neuf. Dans ce montage, la force d'impact n'est pas mesurée; elle est évaluée à partir du poid des masses et de la distance de chute. Un principe semblable a été utilisé dans la conception de la machine d'impact-abrasion à l'Institut de Génie des Matériaux. Cette machine mise au point par Thériault (1986) permet de mesurer la charge statique, la charge dynamique (impact), la vitesse de déplacement du papier abrasif et la vitesse de rotation de l'échantillon sur lui-même. Cette machine est schématisée à la figure 10.

Les différentes machines décrites dans cette section ont soit pour but de simuler les conditions en service, soit d'évaluer l'influence de paramètres calibrés sur l'usure des matériaux. La recherche d'une bonne compréhension des mécanismes de base justifie l'utilisation des machines à paramètres calibrés. Les essais en service (boulets marqués) ont le désavantage d'être très longs et coûteux. Les résultats obtenus sur des modèles réduits seraient représentatifs de la réalité seulement si les taux d'usure et les taux de broyage sont les mêmes qu'à grande échelle.

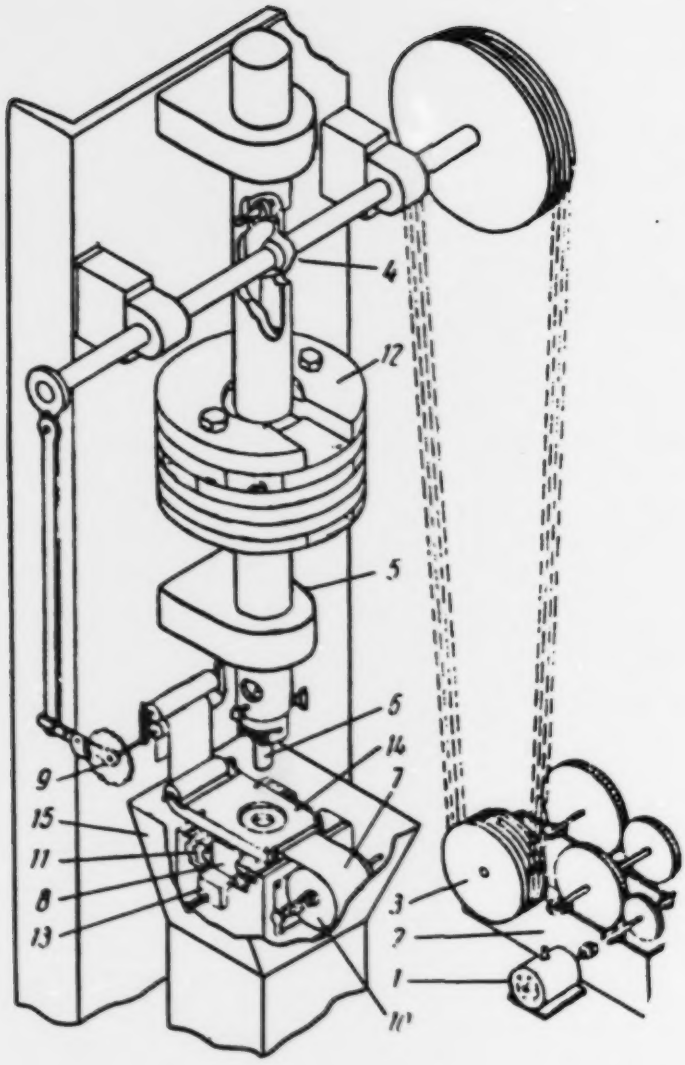


Figure 9 Machine d'usure - impact de Vinogradov et al. (1966)

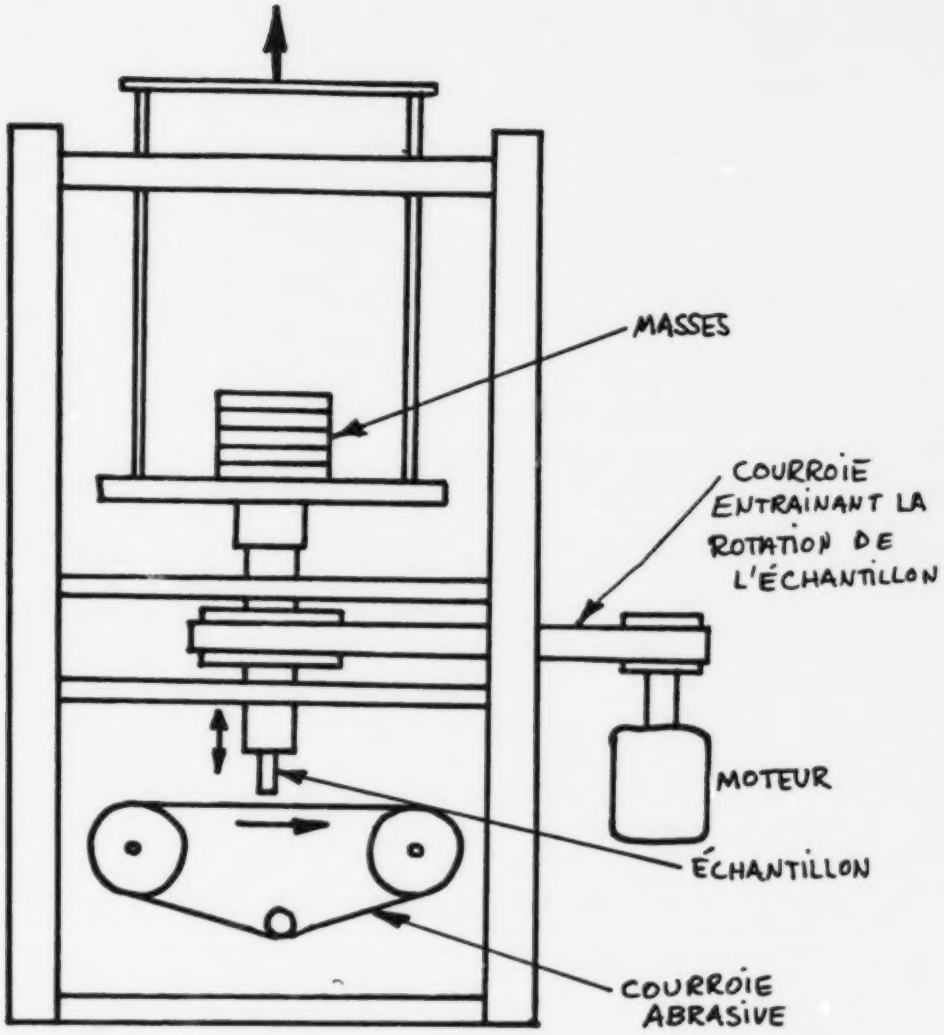


Figure 10 Machine d'impact-abrasion de l'IGM

3. MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LES BOULETS

Le choix d'un matériau pour les boulets est fortement dépendant du type de minerai à broyer. Ainsi, nous ne traiterons pas explicitement du type de boulet utilisé pour un minerai donné. Seuls les différents matériaux utilisés ainsi que leurs principales propriétés mécaniques et microstructurales seront couverts. Bien entendu, le choix d'un type de boulets donné sera aussi fonction du coût associé à la consommation des boulets. Ce dernier point ne peut être traité d'une façon générale et l'analyse revient à une étude différente pour chaque cas particulier.

Les types de boulets utilisés couramment peuvent être regroupés dans quatre grandes classes:

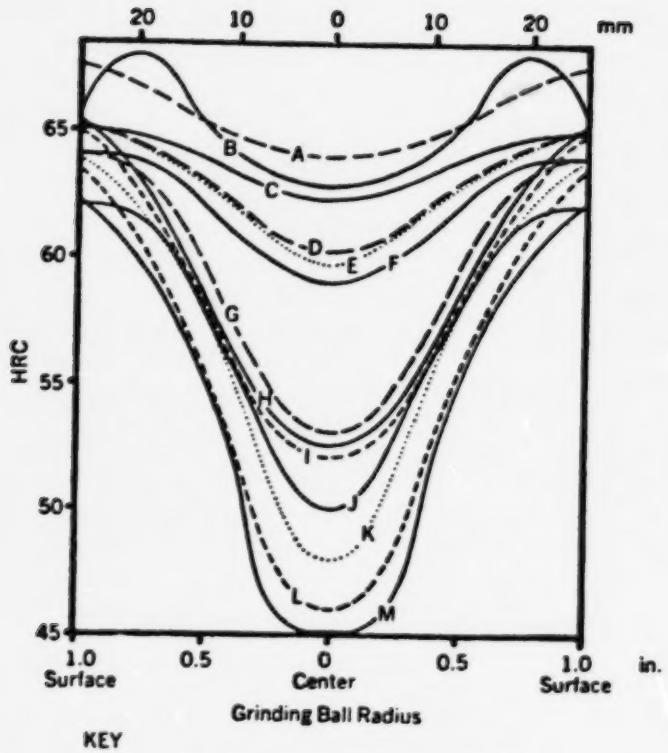
- aciers forgés
- aciers coulés
- fontes blanches
- fontes au chrome

La plupart des études comparatives sur ces matériaux proviennent d'essais par la méthode des boulets marqués. Pour ces raisons, les mécanismes d'usure ne sont pas toujours bien mis en évidence et les résultats se présentent souvent sous forme de liste de matériaux classés du pire au meilleur, pour une application particulière donnée.

Boulets d'acier forgé

Les aciers généralement utilisés ont des teneurs en carbone inférieures à 0,8%. Le durcissement des boulets est obtenu par déformation plastique ce qui conduit à l'obtention de boulets souvent plus durs en surface qu'au coeur (fig. 11). La surface montre donc un bon comportement face à l'abrasion; le coeur moins dur tend à réduire le risque de rupture fragile du boulet. Cependant, lorsque la couche dure en surface est usée, le coeur s'use rapidement et le boulet perd sa forme sphérique. Les vendeurs de boulets en fonte utilisent cet aspect pour montrer le désavantage des boulets forgés, comme le montre la publicité à la figure 12. Dans ce cas, la perte de la forme sphérique du boulet s'accentue en cours de broyage du fait que les autres boulets en cascade roulent à l'intérieur des cavités des boulets usés. L'efficacité de broyage est aussi réduite (Nass, 1974) du fait que les boulets usés non sphériques ont moins tendance à rouler sur la charge.

Iwasaki et al. (1984) montrent aussi l'influence de la densité de la pulpe sur l'usure des boulets forgés bas carbone (0,2% C) et haut carbone faiblement alliés (0,8% C). La figure 13 nous montre que la perte de matière est linéaire dans le temps, pour différentes concentrations de pulpe. Une diminution dans la concentration de solide a pour effet d'augmenter l'usure des boulets et l'efficacité de broyage. L'efficacité de broyage est évaluée (fig. 14) par rapport au pourcentage de particules passant un tamis de 325 mesh. Iwasaki et al. (1984) relient l'usure prononcée des boulets (aux faibles concentrations) à la viscosité de la pulpe. En effet, il est possible que pour de faibles concentrations, le boulet s'entoure d'un film liquide peu visqueux qui facilite une rotation plus rapide du boulet. A cette rotation rapide, correspond une usure plus importante.



KEY

A — — U. S. Forged Cr-Mo-Cu Alloy 66.3 A.V.H.*
B ——— Canada Forged Alloy 65.5
C ——— U. S. Forged Cr-Mo Alloy 64.5
D — — U. S. Forged Cr-Mo Alloy 64.0
E ..... U. S. Forged Cr-Mo Alloy 63.5
F ——— U. S. Forged Alloy 63.0
G — — U. S. Forged Cr-Mo Alloy 62.8
H ——— U. S. Forged C-Mn Steel 62.0
I ---- U. S. Cast Alloy 61.6
J ——— Canada Forged C-Mn-Cr Alloy 60 1
K ..... U S. Forged C-Mn Steel 61.0
L ---- U. S. Forged C-Mn Steel 58 6
M ——— Canada Forged C-Mn Steel 58.4

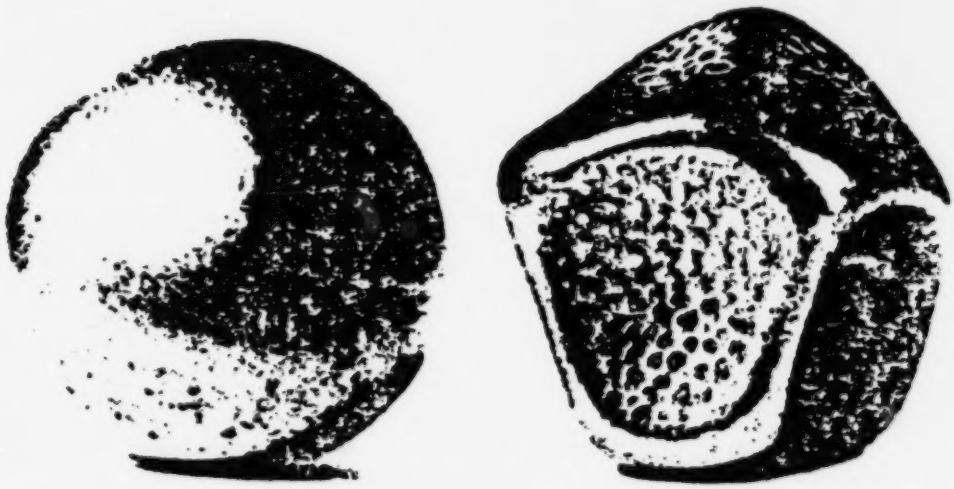
*A.V.H. Is Average Volumetric Rockwell C Hardness.

Figure II Dureté le long d'un diamètre de boulet forgé (Nass, 1974)

HI-CHROME

GRINDING BALLS

will reduce your grinding costs



Hi-Chrome **Forged Steel**

In wet grinding as well as dry, Magotteaux grinding media is the longest lasting media available. Up to **3 times longer** in wet process and **10 times longer** in dry.
Our chromium alloys resist wear in the following ways:

- ☐ **ABRASION RESISTANT** - containing up to 35% chromium carbides (77 Rc) to resist all but the most abrasive ores.
- ☐ **TOTALLY THROUGH HARDENED** - the hardness of our largest diameter media (6") varies no more than 2 Rc from surface to center.

Figure 12 Usure d'un boulet au chrome coulé comparée à celle d'un boulet forgé (publicité Magotteaux)

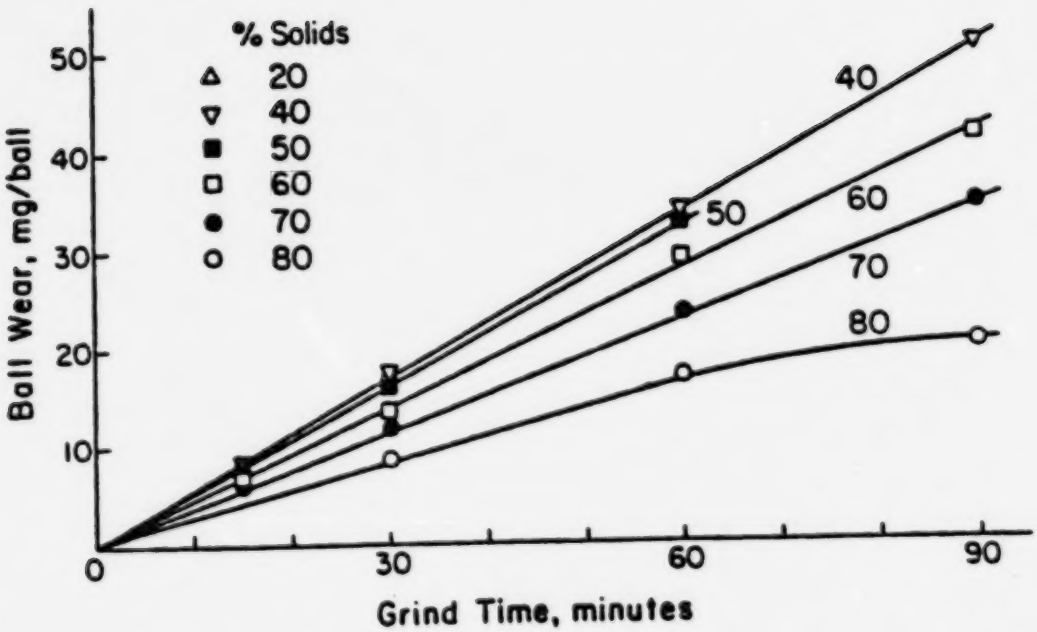


Figure 13 Taux d'usure en fonction de la concentration de la pulpe (Iwasaki et al., 1984)

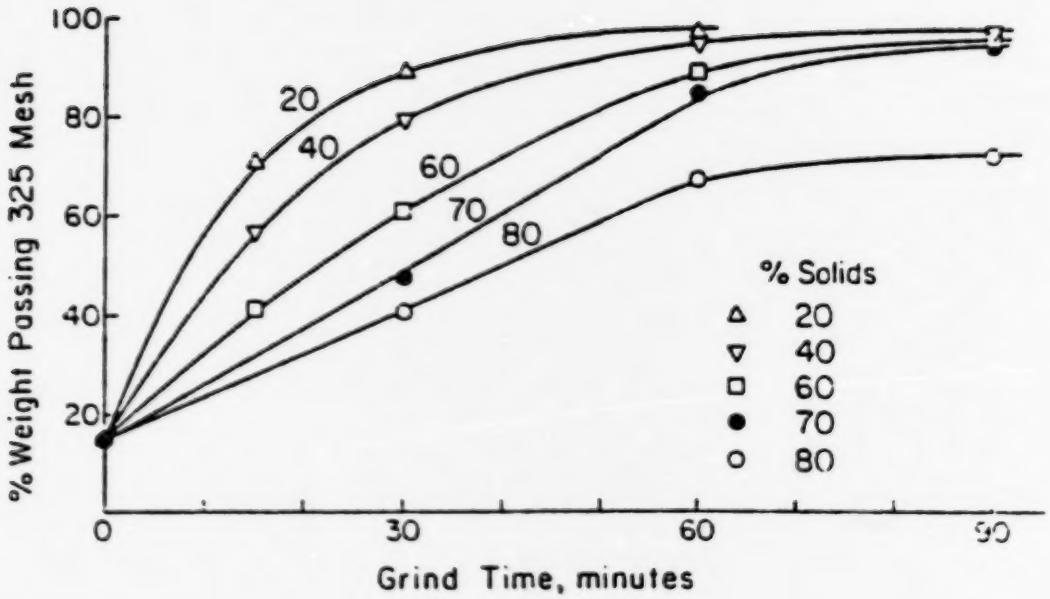


Figure 14 Efficacité de broyage en fonction du temps et de la concentration de la pulpe (Iwasaki et al., 1984)

Lors du broyage du minerai de cuivre par des boulets forgés haut carbone (0,77% C, 0,80% Mn, 0,06% Cr, 0,12% Ni), Lui et Hoey (1977) montrent que la corrosion des boulets forgés est une composante importante de l'usure. Dans le cas particulier étudié, ils trouvent que pour un pH inférieur à 10,5, l'usure dépend de la température et une composante de corrosion est observée. Pour un pH supérieur à 10,5, l'usure est indépendante de la température et purement abrasive. Ils mentionnent que l'utilisation d'additifs servant à augmenter le pH s'avère très utile pour réduire l'usure des boulets.

Boulets coulés en acier

Il n'existe pas de consensus sur la délimitation entre les aciers et les fontes. Plusieurs situent la limite à une proportion de carbone tournant autour de 1,2%. D'autres diront que la fonte contient de "gros carbures". Nous adopterons cette dernière définition pour délimiter les aciers et les fontes.

Afin de caractériser correctement un acier, il faut préciser les éléments d'alliage présents dans celui-ci. Les éléments d'alliage utilisés, même en petites quantités, peuvent avoir une influence prédominante sur la microstructure et, donc, sur le taux d'usure des boulets. Il est utile ici d'énumérer brièvement les principaux éléments d'alliage ainsi que leurs effets sur la microstructure de l'acier.

Le carbone a, d'une façon générale, un effet bénéfique sur les aciers. Une diminution en usure est souvent associée à un accroissement de la teneur en carbone qui joue directement sur la dureté du matériau. Quinn et Hall (1970) mentionnent que pour deux aciers de teneurs en carbone différentes ayant subit des traitements thermiques de telles sortes que leurs duretés soient égales, celui ayant une teneur en carbone plus élevée aura un taux d'usure inférieur. De hautes teneurs en carbone favorisent la présence d'austénite résiduelle. Bien que la présence d'austénite résiduelle soit avantageuse dans l'obtention de bonnes propriétés en impact, elle contribue généralement à une augmentation du taux d'usure en abrasion. La teneur que l'on retrouve en pratique dépend de la dureté visée et du niveau des forces d'impact. Dans les boulets d'acier, cette teneur se situe entre 0,5% et 1,10%. On rencontre le plus souvent des teneurs entre 0,7 et 0,95%.

Le manganèse, tout comme le carbone, a un effet durcisseur sur l'acier. De plus, le manganèse est un élément gammagène ce qui implique une stabilisation de l'austénite et de bonnes propriétés sous impact pour des proportions d'austénite raisonnables. La teneur en manganèse se situe généralement en dessous de 1%. Elle peut être de 0,2% pour les petits boulets jusqu'à 0,95% pour les plus gros. La teneur en manganèse augmente avec la taille des boulets de façon à obtenir une épaisseur durcie en surface suffisante.

Dans les boulets en acier, le chrome est utilisé pour augmenter la dureté de l'alliage. La résistance à l'abrasion est augmentée lorsque le chrome est en solution solide dans l'acier. Le chrome retarde la formation de perlite ce qui

favorise une dureté plus élevée. Les teneurs utilisées sont le plus souvent situées en dessous de 1%. Cet élément est ajouté aux aciers carbone-manganèse pour augmenter l'épaisseur de la couche durcie.

Le molybdène retarde aussi la formation de perlite en supprimant la précipitation des carbures. Le molybdène accroît la résistance à l'impact des structures martensitiques (Irvine et al., 1960). De faibles teneurs entre 0,05% et 0,20% sont utilisées dans les boulets d'aciers.

Suite à l'addition de ces divers éléments d'alliage, les microstructures obtenues ont des propriétés mécaniques très différentes associées à des morphologies variées. P. J. Moroz (1982) a étudié les relations entre les taux d'usure et les microstructures. Ses résultats seront résumés brièvement. L'acier qu'il a utilisé contenait 0,90% de carbone. Les boulets ont été soumis à un essai de boulets marqués. En utilisant plusieurs températures d'austénitisation et de trempe, il obtient des microstructures possédant des proportions de martensite et de perlite ou bainite variées. Comme premier résultat intéressant, il observe que la résistance à l'usure augmente avec la proportion de martensite. Il trouve une relation presque linéaire entre le pourcentage de martensite et le taux d'usure. La dureté varie directement dans le même sens que la proportion de martensite. Dans ce cas, la dureté est un paramètre valable pour prédire la résistance à l'abrasion. Le type de microstructure a donc une influence très importante sur la détermination de la résistance à l'usure; la présence de deux phases de résistances différentes nous amène à croire que la résistance à l'usure de l'acier

dépend aussi des proportions des deux phases. Incidemment, la résistance à l'usure d'un boulet d'acier varie de la surface au coeur du fait que les taux de refroidissement différents amènent des microstructures différentes.

Dans d'autres cas, la microstructure joue un rôle plus important que la dureté dans la détermination de la résistance à l'usure. Moroz observe en effet que la perlite lamellaire a une meilleure résistance à l'usure qu'un acier avec carbures sphéroïdisés à l'intérieur d'une matrice ferritique contenant le même pourcentage de carbone et ayant la même dureté. De plus, la même perlite lamellaire montre aussi une meilleure résistance à l'usure qu'une martensite revenue ayant la même dureté. On doit noter que la résistance à l'usure est évaluée à la suite d'un essai de boulets marqués et que dans ces conditions, les importances relatives des usures par impact et par abrasion peuvent être différentes.

Pour des duretés équivalentes, Moroz observe que la martensite sans revenu possède une meilleure résistance à l'usure que toute autre structure produite dans l'acier, pour une teneur en carbone constante.

Boulets de fonte blanche

Dans les fontes grises, le carbone se retrouve solidifié sous forme de lamelles de graphite. Dans les fontes blanches, le carbone se trouve entièrement à l'intérieur des carbures. Les fontes grises ne montrent pas de bonnes propriétés mécaniques face aux impacts du fait que les lamelles de graphite qui sont relativement minces agissent comme concentreurs de contraintes. L'obtention de fontes blanches ou grises dépend de la composition des alliages et du taux de solidification.

Les carbures présents dans les fontes blanches faiblement alliées se trouvent sous la forme de carbures de fer Fe_3C. Pour des teneurs en chrome jusqu'à 10%, le chrome prend la place du fer pour former des carbures $(Fe\ Cr)_3C$. Ces carbures ont des duretés de l'ordre de 800 à 1200 HV. Pour des teneurs en chrome supérieurs à 10%, l'apparition de carbures $(Fe\ Cr)_7\ C_3$ de duretés situées entre 1300 et 1800 HV améliore considérablement la résistance à l'abrasion (Farge et Barclay, 1974).

La structure de la matrice affecte la dureté de la fonte blanche. Les fontes à matrice perlitique ont une dureté qui dépend de la proportion de carbures ainsi que leurs duretés. La perlite qui a une dureté de 300 à 350 HV couplée aux carbures donne une fonte blanche de dureté variant entre 450 et 600 HV. La dureté des fontes faiblement alliées est fonction de la teneur en carbone qui se trouve en partie dissout dans la matrice, et en plus grande partie, sous forme de carbures. C'est ainsi qu'une fonte faiblement alliée contenant jusqu'à 3,7% de

carbone peut atteindre une dureté de 600 HV. Les fontes blanches à matrice perlitique se retrouvent sur le marché à cause de leur faible coût, malgré que leur résistance à l'abrasion soit moyenne.

La matrice de certaines fontes blanches peut aussi être martensitique. Suite à l'addition de chrome et de nickel, la transformation de l'austénite est retardée, ce qui permet la formation de la martensite lors du refroidissement normal suivant le traitement thermique. C'est ainsi qu'est fabriquée cette fonte mieux connue sous le nom de Ni-Hard dans laquelle il y a 2,5 à 4,5% de nickel et 1,5 à 2,5% de chrome. La dureté de la matrice se situe entre 600 et 700 HV ce qui conduit à des fontes de duretés entre 600 et 750 HV. Le nickel favorise la formation de graphite; ainsi, pour des teneurs plus élevées en nickel, il faut ajouter un élément favorisant la formation de carbures comme le chrome par exemple. Les teneurs en carbone se situent autour de 3,5%. Les boulets de Ni-Hard, peu importe leurs tailles, doivent subir un recuit de détente afin d'éliminer les contraintes résiduelles et d'augmenter la tenacité jusqu'à un niveau favorable pour une bonne résistance aux impacts.

La présence de carbures fragiles à l'intérieur d'une matrice plus ou moins ductile rend difficile l'étude des mécanismes d'usure présents lors du broyage. Comme nous l'avons mentionné plus tôt, les forces d'impact sont difficiles à quantifier et les méthodes d'essais demeurent encore à développer. Vermeulen et Howatt (1984) illustrent bien les contraintes développées lors d'un impact. Tel que montré à la figure 15, l'impact d'une sphère sur un plan engendre une zone conique en compression. La zone entourant ce cône se trouve en tension; la surface conique délimitant ces deux zone voit une contrainte de cisaillement maximum.

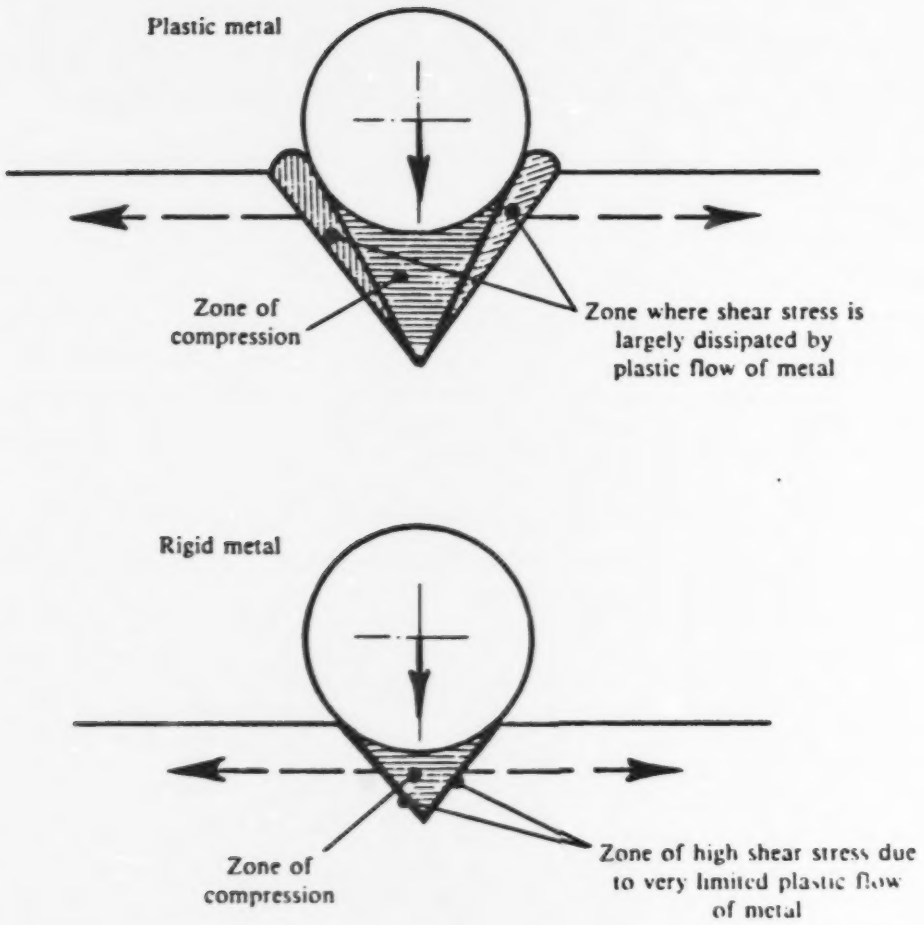


Figure 15 Distribution de la contrainte dans des matériaux ductile et fragile (Vermeulen et Howatt, 1984)

Dans cette région de fort cisaillement, un matériau ductile réagira en formant des bourrelets en surface résultant de la déformation plastique. Un matériau fragile ne pourra dissiper la contrainte de cisaillement sous forme de déformation plastique. Ainsi, la forte contrainte de cisaillement concentrée en cette région peut causer la rupture d'une phase fragile. Sare (1983) observe que l'usure des fontes blanches sous impact est principalement causée par la perte de carbures eutectiques en surface. Il observe à l'intérieur des carbures des fissures parallèles à la surface. Pour expliquer l'usure de telles fontes, il propose un mécanisme de micro-écaillage des carbures suivi d'une déformation de la matrice entourant le carbure. Il associe des mécanismes différents pour des phases différentes du fait que les impédances des phases étant différentes, il y a réflexion de l'onde de contrainte à l'interface carbure-matrice.

Dans certains cas, cette réflexion peut amener une amplification de la contrainte par interaction avec l'onde incidente.

Afin de résumer les mécanismes responsables de l'usure des fontes blanches, on peut isoler l'effet des carbures et de la matrice:

- Les carbures durs ont un bon comportement face à l'abrasion mais s'écaillent suite à la rupture fragile causée par l'impact.

- La matrice, plus ductile, s'use surtout en abrasion. Sous les impacts, une bonne tenacité de la matrice minimise la rupture macroscopique du boulet.

Fontes blanches à haute teneur en chrome

Lors du broyage du minerai, l'usure par abrasion est causée par la dureté élevée des particules à broyer (jusqu'à 2100 HV). Ainsi, une première amélioration consiste à augmenter la dureté des boulets. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, ceci peut être fait en augmentant la proportion de carbures. Les fontes blanches à haute teneur en chrome possèdent l'avantage d'être dures et résistantes à la corrosion. Une grande partie du chrome se trouve sous forme de carbures $(Fe\ Cr)_7\ C_3$ et $(Fe\ Cr)_{23}\ C_6$. Une certaine fraction se trouve en solution donnant à la matrice une bonne résistance à la corrosion. Des teneurs pouvant aller jusqu'à 27% de chrome et 3,5% de carbone peuvent être trouvées sur le marché.

Sailors et Owens (1982) présentent une courbe (fig. 16) sur laquelle on peut déterminer le pourcentage de carbures dans l'alliage pour des teneurs en carbone et en chrome données. Afin d'obtenir une dureté maximale des boulets, une matrice martensitique sera préférée. La martensite peut être obtenue par traitement thermique; ce traitement a aussi pour effet d'activer la diffusion du carbone et du chrome qui formeront des carbures secondaires. Cette formation de carbures secondaires appauvrit la matrice austénitique en carbone de façon à la déstabiliser et à accélérer la transformation martensitique (Moroz, 1982).

Les boulets de fontes avec matrice de martensite sont plus résistants à l'usure par abrasion lorsqu'ils sont bruts de coulée comparés à ceux ayant subi un revenu.

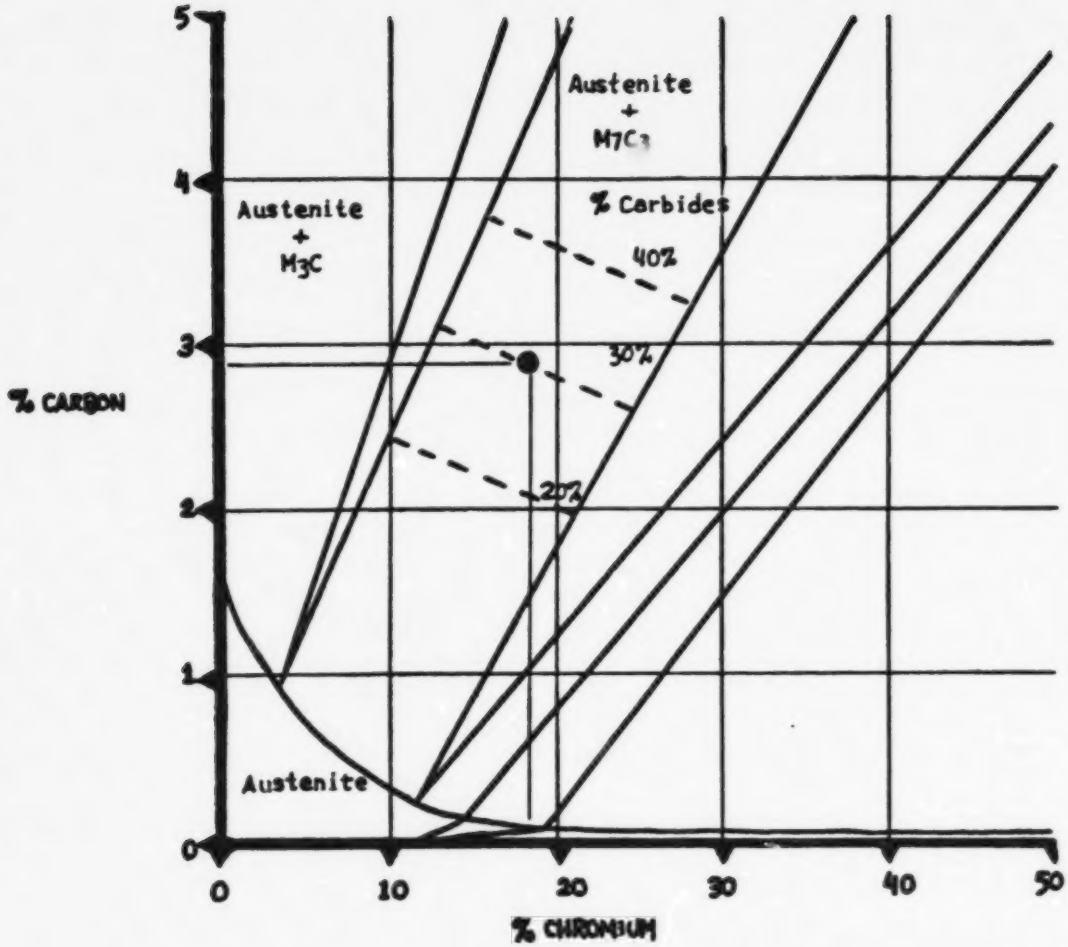


Figure 16 Section du diagramme Fe-C-Cr à 1000°C

(Sailors et Owens, 1982)

Pour une application particulière, Moroz observe une piqûration pour des boulets contenant 3,1% de carbone et 14% de chrome, corrosion très réduite pour des boulets à 3,2% de carbone et 18% de chrome et aucune corrosion pour 2,9% de carbone et 22% de chrome. La piqûration a lieu dans la matrice, les carbures ne sont pas attaqués. Cet auteur observe un seuil critique de chrome au dessus duquel il n'y a plus de corrosion. Ce seuil dépend de la composition de la pulpe et des paramètres d'opération du broyeur.

Corrosion

Norman et Loeb (1948) identifient deux mécanismes d'usure dans les broyeurs à boulets. Un premier mécanisme consiste à enlever à la surface des boulets une couche oxydée qui se forme à partir d'une surface fraîchement exposée au milieu corrosif. Le choix judicieux d'un matériau ayant une composition chimique donnant un oxyde dur et adhérent, aide à contourner le problème. Le deuxième mécanisme d'usure est associé à l'arrachement de matière en surface sous forme de particules métalliques. La distribution et la forme des phases constituantes de la microstructure sont les aspects qui contrôlent ce mécanisme d'usure. Dans certains cas, l'usure par abrasion est suffisamment sévère pour que l'effet de la corrosion soit négligeable. Natarajan et al. (1983) notent dans un cas particulier que l'usure en milieu humide est supérieure comparée au broyage à sec. L'utilisation d'eau dans les broyeurs a l'avantage d'augmenter l'efficacité du broyage; par contre, la consommation des boulets est généralement accrus. La figure 17 montre que pour un indice d'abrasivité du minerai constant, la perte de matière associée à l'usure est plus grande en milieu humide.

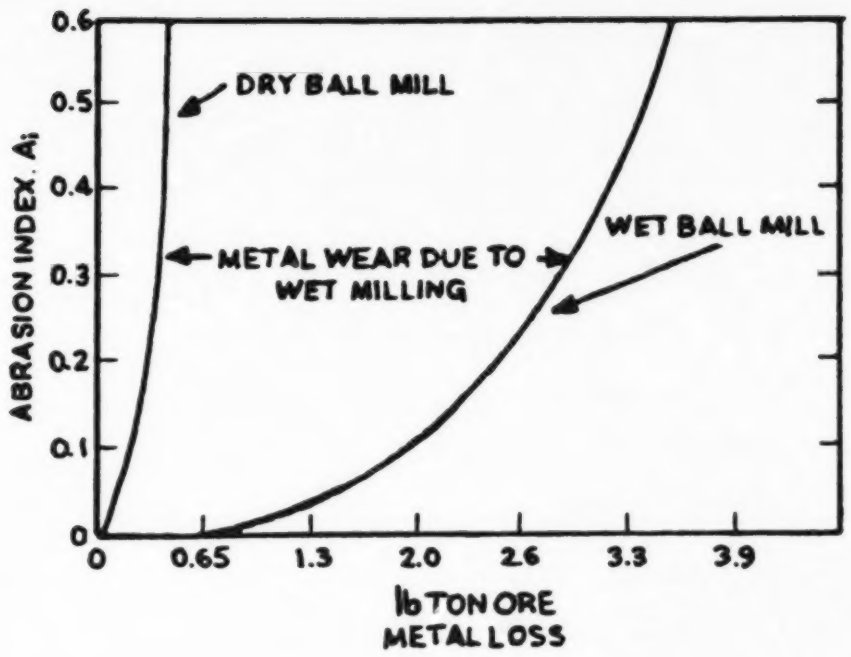


Figure 17 Indice d'abrasivité en fonction de l'humidité du milieu

(Jones, 1985)

La nature du matériau joue un rôle très important dans la corrosion des boulets. La présence d'une matrice perlitique lamellaire amène une corrosion accélérée due aux micropiles constituées par les lamelles de ferrite et de cémentite, la ferrite étant anodique. De plus, les boulets subissant un écrouissage important en surface sont aussi exposés à la corrosion, les zônes écrouies étant anodiques.

Les problèmes de corrosion peuvent être contournés par l'addition de chrome. Cependant, le coût élevé du chrome nécessite une utilisation modérée de cet élément.

De plus, la présence d'une deuxième ou troisième phase conduit à une augmentation du risque de corrosion (Moore et al., 1984). Moore et al. (1984) mentionnent que dans les applications à haute abrasivité et à forte corrosion, les fontes haut chrome-molybdène à matrice martensitique avec haute teneur en carbone démontrent la meilleure résistance, particulièrement pour des niveaux de pH situés entre 4 et 12.

Choix du matériau

Le choix d'un matériau plutôt qu'un autre trouve le plus souvent sa justification dans les considérations économiques. Crisi (1981) fait une étude comparative pour le cas du broyage à sec du ciment portland. Il compare trois types de boulets: boulets forgés en acier, boulets coulés à 1% Cr et boulet à 12% Cr. Il observe que les boulets forgés sont 30% moins coûteux que les boulets à 12% Cr mais leur consommation et 10 fois supérieure. De plus, les boulets à 1% Cr coûte 50% moins cher que les boulets à 12% Cr et s'usent 4 fois plus vite. En comparant ces

trois types de boulets par rapport à la perte de masse en grammes par tonne de minerai broyé par unité de prix des boulets à l'achat, on obtient le résultat suivant:

boulets forgés	1000 g/tonne/$
boulets 1% Cr	240 g/tonne/$
boulets 12% Cr	30 g/tonne/$

En d'autres mots, bien que le prix des boulets haut chrome est considérablement plus élevé que celui des autres types de boulets, la consommation par dollar dépensé est plus faible. Dans cette application, l'achat de boulets plus coûteux est justifié!

4. BLINDAGE DES BROYEURS

Jusqu'à 1926, les broyeurs étaient de dimensions assez réduites. Le diamètre des tambours se situait entre 3 et 7 pieds. Peu d'attention était alors portée vers les matériaux de blindage. Lors des années qui suivirent 1926, les alliages de fer connaissent une certaine popularité comme matériau de blindage dans les broyeurs avec diamètres allant jusqu'à 10 pieds. Jusqu'aux années 1950, le traitement thermique du blindage est encore marginal. De 1950 à nos jours, l'augmentation de la taille des broyeurs nécessite l'emploi de blindage à haute résistance aux impacts et à l'abrasion (Rosenblatt, 1977).

4.1 Forme du blindage

Il a été montré que la conception de la forme du blindage joue un rôle très important sur le taux d'usure de celui-ci (Windolph, 1956). L'avantage de la mise en forme par coulée est évident compte tenu du faible coût associé aux modifications du profil des parties du blindage. Le blindage interne des broyeurs à boulets joue essentiellement trois rôles. Le premier rôle consiste à soulever les boulets de la charge de façon à provoquer leur chute. Le blindage peut aussi être fait de telle sorte qu'il sépare les boulets de tailles différentes; il s'agit ici d'un rôle classificateur. Comme nous l'avons vu plus tôt, les broyeurs longs peuvent contenir plusieurs compartiments séparés par des grilles. Chaque compartiment peut alors contenir des boulets de tailles différentes des autres compartiments (les plus gros boulets se trouvant dans le compartiment où entre l'alimentation). Un blindage classificateur permet la ségrégation des boulets sans l'utilisation de grilles. Différents types de formes de blindage pour soulever et classifier sont montrés aux figures 18 et 19 respectivement.

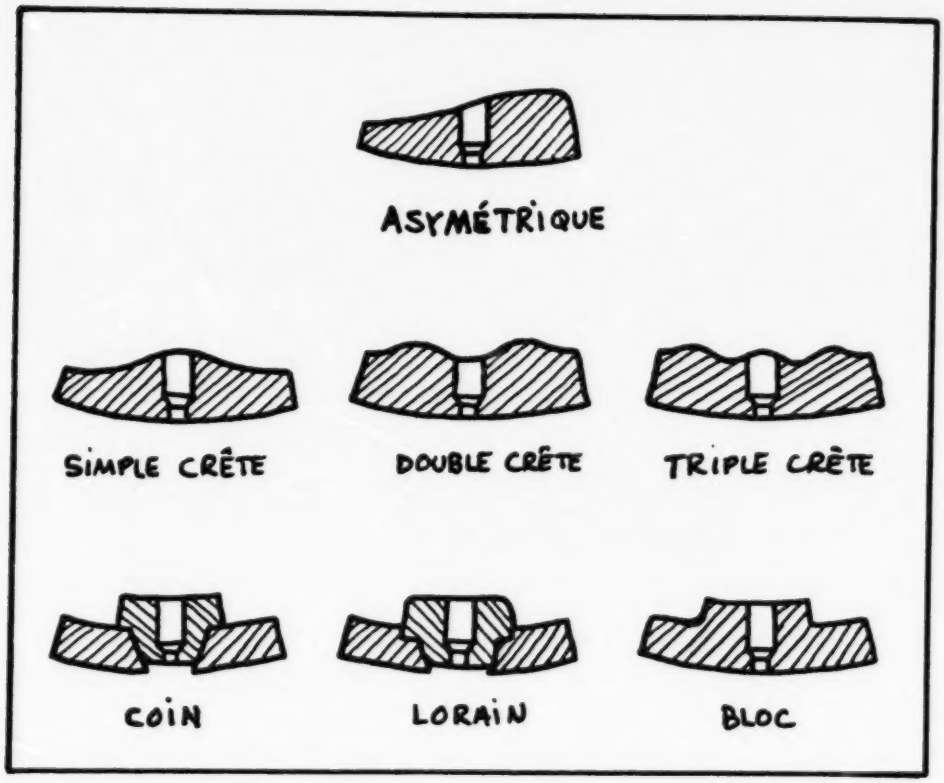


Figure 18 Formes de différents blindages pour soulever les boulets (Crisi, 1981)

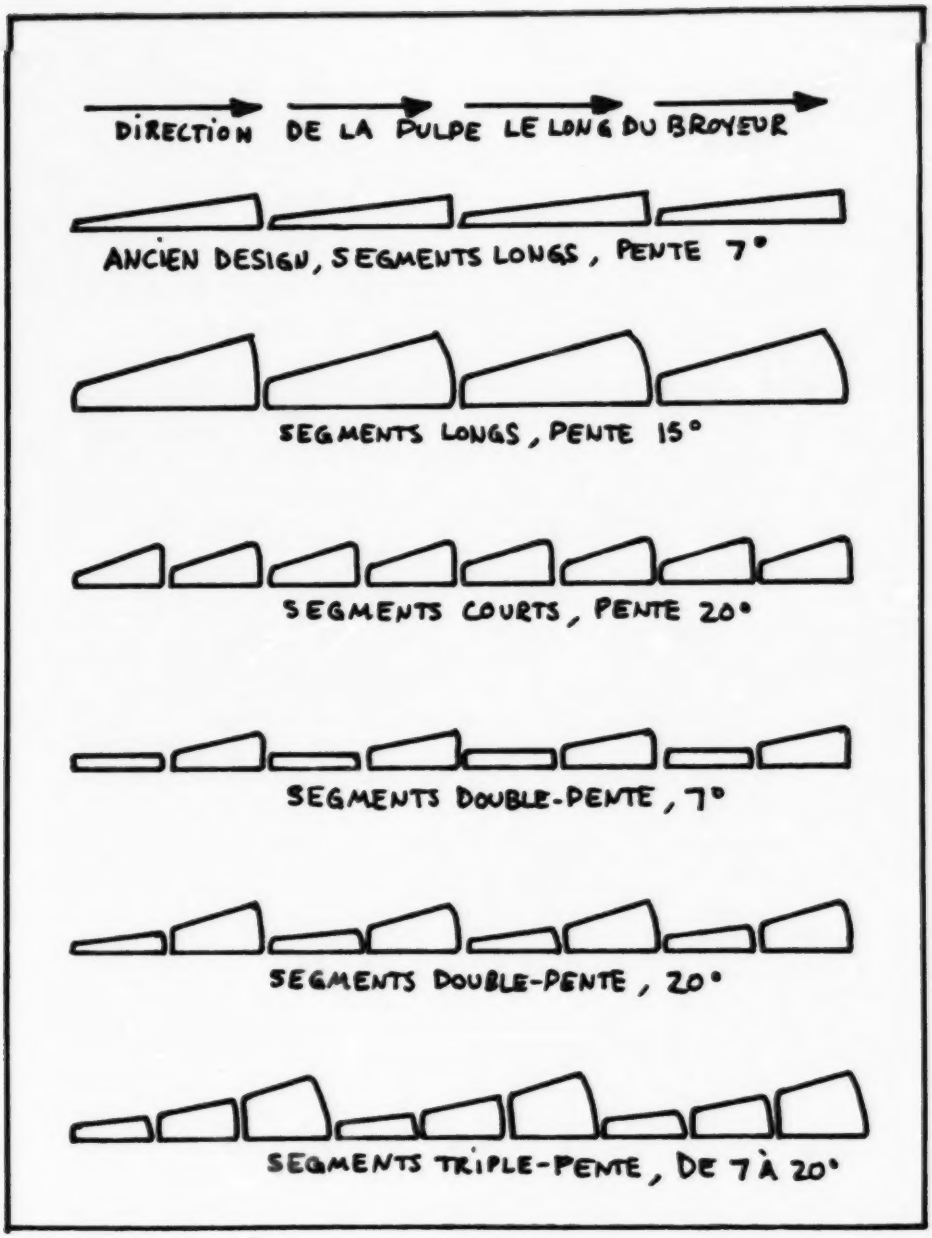


Figure 19 Formes de divers blindages classificateurs (Crisi, 1981)

Le troisième rôle du blindage réside dans la protection du cylindre du broyeur. Il sert aussi à réduire le niveau de bruit, dans la mesure du possible.

Sans trop entrer dans les détails, il est important de préciser que la forme des parties constituantes du blindage joue un rôle important sur l'efficacité du broyage. Ainsi, il est souhaitable d'avoir une forme qui demeure efficace pour le levage des boulets même lorsque le blindage est usé. Dunn (1976) compare les profils usés de différents types de blindage (fig. 20). Le blindage avec chevauchement des segments (shiplap design) est reconnu pour son faible pouvoir de levage et le roulement qu'il impose aux boulets. Le profil usé de ce type de blindage tend vers une forme sinusoidale. Climax développe un blindage avec une forme telle qu'elle demeure identique lors du broyage, malgré l'usure.

Certains paramètres empiriques sont utilisés dans la conception de profil de blindage. Les rayons de courbures doivent être maximisés de telle sorte que les concentrations de contraintes soient faibles (Barclay, 1983). Les trous pour fixer les segments au tambour doivent être en nombre suffisant sans toutefois augmenter inutilement le temps de remplacement. Le blindage devrait de plus être facile à inspecter et de taille raisonnable pour faciliter la vérification et le remplacement. L'utilisation du blindage dans les deux sens de rotation du broyeur est aussi un atout. Pour les broyeurs à boulets, la hauteur des crêtes du blindage est généralement de une demie à une fois le diamètre du boulet. L'espace entre deux crêtes est de l'ordre de 1,5 fois le diamètre du boulet. Le blindage double-crête (double wave) donne de bonnes performances. Les crêtes peuvent être arrondies ou

carrées; le mouvement des boulets est accentué dans ce dernier cas (Arnson et al., 1982).

4.2 Matériaux utilisés pour le blindage

Comme dans le cas des boulets, une grande gamme de matériaux est utilisée dépendant des applications particulières. Dans beaucoup de cas, ces matériaux sont les mêmes que ceux utilisés pour les boulets du fait qu'ils sont aussi soumis à l'abrasion et aux impacts. Pour cette raison, la description de chaque type de matériau sera abrégée.

Une bonne revue sur ce sujet a été présentée par Norman (1974) décrivant les divers matériaux parallèlement a quelques faits historiques.

Aciers au manganèse

Les aciers au manganèse, communément appelés "aciers Hadfield", étaient reconnus au début pour leur faible coût. Les aciers austénitiques au manganèse contiennent typiquement 12% de manganèse, 1,2% de carbone et autour de 1% de chrome/molybdène de façon à augmenter la résistance à l'abrasion. Le problème majeur avec ces types d'acier réside dans le fait qu'ils nécessitent des forces d'impact considérables pour que la transformation martensitique se produise. Le durcissement par écrouissage donne une bonne résistance à l'abrasion; dans les broyeurs où les impacts sont faibles, la couche martensitique se forme au même taux que l'usure de surface. L'emploi d'aciers Hadfield n'est pas adéquat dans de telles conditions.

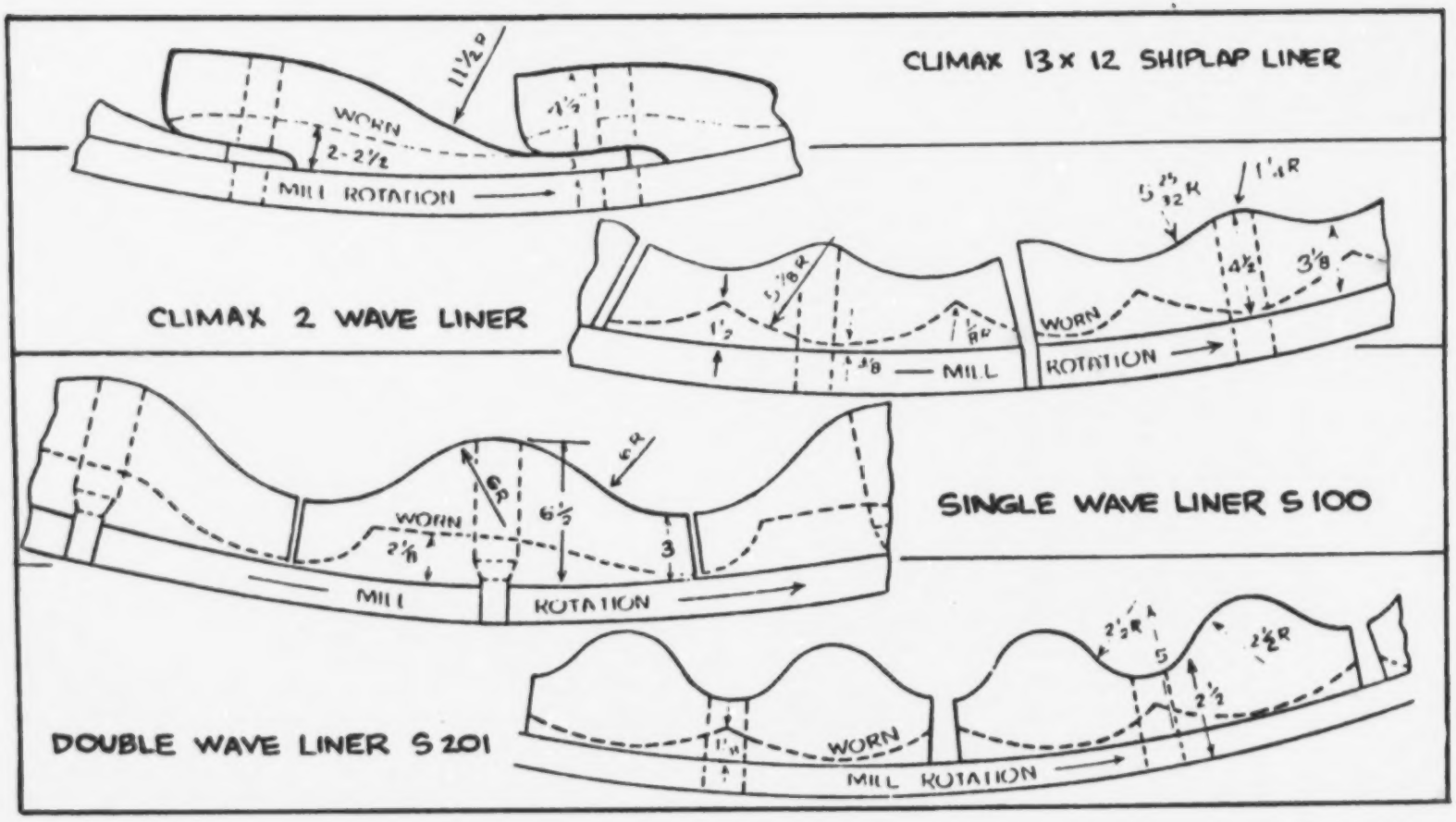


Figure 20 Profil de différents types de blindage. Le pointillé indique le profil après usure (Dunn, 1976)

De plus, dans le cas où les impacts sont suffisamment intenses, la déformation plastique à la base de la transformation amène une certaine difficulté dans l'entretien et le remplacement du blindage (Dougall, 1974).

Aciers chrome-molybdène perlitiques

Jusqu'à récemment, ce matériau correspondait au plus haut niveau de production. Sa popularité est essentiellement basée sur son faible coût. Cet alliage contient 2,25% de chrome et 0,4% de molybdène. Deux teneurs en carbone sont communément rencontrées: 0,6% et 0,85%. Étant donnée la structure perlitique découlant du refroidissement à l'air, de grosses pièces peuvent être coulées. Ces alliages sont surtout caractérisés par leur faible niveau de contraintes résiduelles et leur faible limite d'élasticité.

Aciers chrome-molybdène martensitiques

Ces aciers pouvant être produits à faible coût possèdent des duretés leur conférant de bonnes résistances à l'abrasion. Différentes propriétés mécaniques peuvent être obtenues en variant les traitements thermiques et les teneurs en carbone. Les teneurs maximales en chrome et molybdène sont de 2% et 0,5% respectivement. Ce type de matériau fait concurrence aux fontes blanches au chrome.

Fontes blanches nickel-chrome et chrome-molybdène

D'une façon générale, les fontes blanches nickel-chrome (Ni-Hard) et les fontes Cr-Mo ont de très bonnes résistances à l'abrasion et à la corrosion. La fragilité de ces matériaux nécessite une vigilance accrue lors du design du blindage afin d'éviter la formation de fissures importantes lors du refroidissement. Albright et Dunn (1983) observent que les fontes Cr-Mo s'usent plus vite que les fontes Ni-Cr malgré la présence de carbures M_7C_3 comparée à celle de carbures M_3C dans le Ni-Hard.

Caoutchouc

L'utilisation de caoutchouc comme matériau de remplacement pour le blindage laisse entrevoir de grandes économies. Le gain associé à la réduction de poids est aussi considérable. Les premiers essais démontrent que le profil du blindage tend à se conserver lors du broyage en considérant l'usure (Beebe et Merklin, 1969). Très peu d'informations concernant ce type de blindage sont disponibles. On peut cependant prédire une bonne résistance aux impacts et à l'abrasion. Le gougeage pose cependant un problème et l'utilisation d'élastomère est peut-être favorable dans le broyage de particules fines.

CONCLUSION

Cette revue ne permet pas l'élucider les problèmes associés à la compréhension des mécanismes d'usure. Cependant, elle permet de situer l'état actuel des connaissances tout en tenant compte des diverses orientations déjà prises.

Les tests standards pour évaluer la durée de vie d'un boulet sont inexistants. Seul le test du boulet marqué donne des résultats quantitatifs de bonne qualité. Plusieurs études tentent de simuler l'usure des boulets en ayant des paramètres calibrés.

L'énumération des divers types de matériaux utilisés démontre bien que l'influence de la microstructure joue un rôle de première importance dans la résistance à l'usure des boulets.

RÉFÉRENCES

- Albright, D.L. et Dunn, D.J. (1983), Wear behavior of iron and steel castings for the mining industry, J. of Metals, 35, 23.

- Arnson, H.L., Parks, J.L. et Larsen, D.R. (1982), Alloys and designs for large mill liners and crusher parts, AIME Intermountain minerals conf., Vail, Colorado, 25.

- Austin L.G. et Klimpel, R.R. (1985), Ball wear and ball size distributions in tumbling ball mills, Wear, 41, 279.

- Barbery, G. (1985), Étude de faisabilité de la détermination de l'usure des boulets et des blindages dans les broyeurs industriels par la technique du marquage, Rapport soumis à l'Institut de Génie des Matériaux.

- Barclay, G.A. (1983), Steel castings used in crushing and grinding, Can. Centre for mineral and energy tech., 15th annual meeting of the Can. Mineral Processors div. of CIM.

- Bayer, R.G., Engel, P.A. et Sirico, J.L. (1972), Impact wear testing machine, Wear, 19, 343.

- Beebe, R.R. et Merklin, K.E. (1969), Rubber vs steel in ball mill liners, Min. Congress J., 55, 54.

- Blanc, E.C. (1965), Répercussion de la recherche sur la technologie des appareils de fragmentation industriels, Colloque ANRT, p. 33-51.

- Blickensderfer, R. et Forkner, B.L. (1983), Ball-on-block impact spalling wear test and results on several iron alloys, Rep. Invest. 8794, Bureau of Mines, Dept. of the Interior U.S..

- Blickensderfer, R., Tylczak, J.H., Madsen, B.W. et Hansen, J.S. (1984), Evaluating and improving materials for mineral processing, Conf. proc. of tribology in mineral extraction - War on wear, Nottingham, U.K., Paper c. 347.

- Bond, F.C. (1952), The third theory of comminution, Trans. AIME, 193, 484.

- Crisi, J.S. (1981), Selecting balls and liners for grinding mills, Chem. Eng., 88, 127.

- Davis, E.W. (1919), Fine crushing in ball mills, Trans. AIME, 61, 250.

- Desrumaux, F. (1972), Le broyage fin et les installations de broyage, Ind. Cer., nov., 3.

- Dodd, J. et Dunn, D.J. (1983), The relative importance of erosion and corrosion on metal loss in ball milling, Climax Molybdenum Co.

- Dougall, J.R. (1974), An approach to mill liner materials for critical grinding service, Materials for the mining industry, R.Q. Barr (ed.), Climax Molybdenum Co., Annarbor, Michigan, 169.

- Dunn, D.J. (1976), Optimizing ball mill liners for production and economy, Soc. of Min. Eng., 28, 32.

- Dunn, D.J. et Martin, R.G. (1978), Measurement of impact forces in ball mills, Min. Eng., 30, 384.

- Farge, J.C. et Barclay, G.A. (1974), Properties and performance of cast-iron grinding balls, Materials for the mining industry, R.Q. Barr (ed.), Climax Molybdenum co., Annarbor, Michigan, 189.

- Irvine, K.J., Pickering, F.B. et Garstone, J. (1960), J. Iron and steel inst., 196, 66.

- Iwasaki, I., Riemer, S.C. et Orlich, J.N. (1984), Erosive wear in taconite grinding, SME-AIME Fall meeting, Denver, Colorado, paper 316.

- Jones, D.A. (1985), Corrosive wear in wet ore grinding systems, J. of Metals, 6, 20.

- Kick, F. (1885), Das Gesetz der Proportionalem Widerstand und Seine Anwendung, Felix, Leipzig.

- Lui, A.W. et Hoey, G.R. (1977), Use of alkaline additives to reduce wear on steel balls in grinding low-grade copper ore, Br. Corros. J., 12, 51.

- Moore, J.J., Iwasaki, I., Natarajan, K.A., Perez, R. et Adam, K. (1984), The effect of grinding ball composition and mineral slurry environment on grinding media wear, Conf. proc. of tribology in mineral extraction - War on wear, Nottingham, U.K., Paper c. 352.

- Moroz, P.J. (1982), The effects of matrix hardness and microstructure on the wear of steel grinding balls during wet iron ore grinding, Intermountain minerals symposium, Vail, Colorado, Climax Molybdenum Co., 63.

- Nass, D.E. (1974), Steel grinding media used in the U.S. and Canada, Materials for the mining industry, R.Q. Barr (ed.), Climax Molybdenum Co., Annarbor, Michigan, 173.

- Natarajan, K.A., Riemer, S.C. et Iwasaki, I. (1983), Corrosive and erosive wear in magnetic taconite grinding, Preprint no 83-602, SME-AIME Annual meeting, Atlanta, Georgia, mars 6-10, 1983.

- Norman, T.E. (1974), A review of materials for grinding mill liners, Materials for the mining industry, R.Q. Barr (ed.), Climax Molybdenum Co., Annarbor, Michigan, 207.

- Norman, T.E. et Loeb, C.M. (1948), Wear tests on grinding balls, AIME Trans., 176, 490.

- Prentice, T.K. (1943), Ball wear in cylindrical mills, J. Chem. Min. Metall. Soc. S. Afr., Jan., p. 99.

- Quinn, A.C. et Hall, D.W. (1970), Soc. of auto. Eng. Tech. Pub. 700688.

- Rice, S.L. (1977), Reciprocating impact wear testing apparatus, Wear, 45, 85.

- Rigaut, B., Pavy, J.C. et Jarlan, L. (1976), Contribution à l'étude des usures de corps broyants utilisés dans les broyeurs à boulets, Industrie Minérale, numéro spécial 15 mars 1976, p. 95.

- Rosenblatt, D.N. (1977), Factors involved in liner wear, Wear of materials 1977, ASME, 158.

- Sailors, R.H. et Owens, J. (1982), Cast high chromium media in wet grinding, Intermountain minerals conf., Vail, Colorado, Climax Molybdenum Co., 53.

- Sare, I.R. (1983), Repeated impact - abrasion of ore - crushing hammers, Wear, 87, 207.

- Témoin, A. (1974), Développements récents en broyage - séchage des minerais et minéraux, Rev. des Mat. de Constr., no 690, 271.

- Thériault, Y. (1986), Conception et évaluation d'une machine d'usure - impact, Rapport IGM 86-204-457, Institut de Génie des Matériaux.

- Vermeulen, L.A. et Howatt, D.D. (1983), Analysis of the results of a marked-ball test in relation to theories of ball wear in rotary mills, Report no. M77, Mintek.

- Vermeulen, L.A. et Howatt, D.D. (1984), Abrasive and impactive wear of high-chromium cast-iron grinding balls, Report no. M116, Mintek.

- Vermeulen, L.A., Howatt, D.D. et Gough, C.L.M. (1983), J. South. Afr. Inst. Min. and Met., 83, 189.

- Von Rittinger, P.R. (1867), Lehrbuch der Aufbereitungs Kunde, Ernst et Korn, Berlin.

- Vinogradov, V.N., Sorokin, G.M. et Shreiber, G.K. (1966), Method of wear testing with impact against and abrasive surface, Indus. Lab., 32, 1723.

- White, F.C., Noah, ST., Kettleborough, C.F. et Griffin, R.B. (1984), An apparatus for the study of wear under dynamic loading conditions, Wear, 97, 179.

- Wills, B.A. (1985), Mineral processing technology, Perganon Press.

- Windolph, F.J. (1956), Performance of steel liners in ball mills, Min. Eng., august, 818.